

30-0372/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

ibmb

TU BRAUNSCHWEIG

ABSCHLUSSBERICHT

Rauch- und Heißgasbewegungen in unterirdischen Verkehrsanlagen

vorgelegt von

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 82
D-38106 Braunschweig

Dipl.-Ing. Gary Blume
Dr.-Ing. Ekkehard Richter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina

Dezember 1993

Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für
Raumordnung, Bauwesen und Städtebau gefördert
(Az: B II 5 - 81 07 91 - 17)

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	4
1 Einleitung	8
2 Grundlagen	11
2.1 Vergleichsrechnungen mit dem Modell	11
2.2 Theoretische Grundlagen	11
2.2.1 Beschreibung des Zonenmodelles	11
2.2.2 Vertikale Ventilationsöffnungen	16
2.2.3 Stoff- und Energieaustausch zwischen den Schichten	18
2.2.4 Wärmeübertragung durch Konvektion	20
2.2.5 Wärmeübertragung durch Strahlung	20
2.3 Entstehung und Ausbreitung der Brandgase	20
2.3.1 Sichtbehinderung durch Rauchpartikel	20
2.3.2 Bildung toxischer Verbrennungsgase	23
3 Versuchstunnel und Meßtechnik	24
3.1 Beschreibung des Tunnels	24
3.2 Versuchsprogramm	25
3.3 Meßausrüstung	26
3.3.1 Temperaturmessung	27
3.3.2 Messung der Gasgeschwindigkeit	28
3.3.3 Rauchgasdichte	29
3.3.4 Gasanalyse	30
3.3.5 Ausstattung des Tunnels	31
4 Brandversuche	33
4.1 Versuchsaufbau und -durchführung	33
4.1.1 Holzkrippenversuch Nr. 3	33
4.1.2 Holzkrippenversuch Nr. 4	36
4.1.3 Mischbrandlast (LF TIR)	39
4.2 Meßergebnisse	41
4.2.1 Holzkrippenbrandversuche	42
4.2.2 Rauchentwicklung bei den Holzkrippenbrandversuchen	46
5 Berechnungen mit FIGARO	47

6	Vergleich von Meß- und Berechnungsergebnissen	49
6.1	Holzkippenbrand Nr. 3	49
6.1.1	Abbrandrate	49
6.1.2	Temperaturen	50
6.1.3	Heißgasgrenzschicht	53
6.1.4	Konzentration der Verbrennungsgase	56
6.1.5	Extinktionskoeffizient	58
6.2	Holzkippenbrand Nr. 4	60
6.2.1	Abbrandrate	60
6.2.2	Temperaturen	60
6.2.3	Heißgasgrenzschicht	62
6.2.4	Konzentration der Verbrennungsgase	63
6.2.5	Extinktionskoeffizient	65
6.3	Mischbrandlast LF TIR	66
6.3.1	Abbrandrate	68
6.3.2	Temperaturen	68
6.3.3	Heißgasgrenzschicht	71
6.3.4	Gaskonzentration in den Schichten	75
6.3.5	Extinktionskoeffizient	77
6.4	Zusammenfassung	78
6.4.1	Holzkippenbrand Nr. 3	79
6.4.2	Holzkippenbrand Nr. 4	79
6.4.3	Mischbrandlast (LF TIR)	79
7	Variation der Berechnungsgeometrie	81
7.1	1. Variation	81
7.1.1	Abbrandrate	82
7.1.2	Temperaturen	82
7.1.3	Konzentration der Verbrennungsgase	85
7.1.4	Extinktionskoeffizient	88
7.2	2. Variation	89
7.2.1	Temperaturen	90
7.2.2	Heißgasgrenzschicht	93
7.2.3	Konzentration der Verbrennungsgase	94
7.3	Zusammenfassung	94
7.3.1	1. Variation	94
7.3.2	2. Variation	95
8	Flucht und Rettung	97
8.1	Gefahr durch Heiß- und Rauchgase	97
8.2	Gefahr durch Verbrennungen	101
9	Zusammenfassung	105
	Literaturverzeichnis	109

INHALTSVERZEICHNIS	3
Abbildungsverzeichnis	111
A Lage und Vermaßung der Meßstellen	115
A.1 Meplan 1992	115

Formelzeichen

Zeichen	Erklärung	Dimension
<u>Große lateinische Buchstaben</u>		
A	Fläche	m ²
B	Breite	m
D	Optische Dichte	1/m
E	Energie	kJ
\dot{E}	Energiefreisetzungsrate	kW
Gr	GRASHOF-ZAHL	–
H	Höhe	m
H _u	Heizwert	kJ/kg
\dot{H}	Enthalpiestrom	kW
I	Lichtintensität	cd/m ²
K	Gleichgewichtskonstante	–
L	Länge	m
M	Masse	kg
\dot{M}	Massestrom	kg/s
Mol	Molekulargewicht	kg/kmol
\dot{Q}	Wärmestrom	kW
\dot{R}	Pyrolyse- oder Abbrandrate	kg/s
Ri	RICHARDSON-ZAHL	–
Rz	mittlere Rauigkeit der Tunneloberfläche	m
T	Temperatur	K
U	Umfang	m
V	Volumenkonzentration	Vol. – %
X _d	spezifisches Rauchpotential, Verbrennung	m ² /kg
X _k	Bildungsrate der Gaskomponente k	kg/kg
X _s	spezifisches Rauchpotential, Verswelung	m ² /kg

Zeichen	Erklärung	Dimension
---------	-----------	-----------

Kleine lateinische Buchstaben

c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	kJ/kgK
d_i	innerer Durchmesser eines Querschnittes	m
dx	durchstrahlte Weglänge	m
e	Entrainmentkoeffizient (Schichtenströmung)	—
f	Entrainmentkoeffizient (Plume)	—
f_k	stöchiometrische Koeffizienten	—
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Höhe (variabel, = y-Koordinate)	m
k	Extinktionskoeffizient nach ÖSTMANN	$1/\text{m}$
k_p	Kalibrierungsfaktor für BiDi	—
m	Mol-Anteile im Brennstoff (Wasserstoff)	—
\dot{m}	spezifischer Massenstrom	kg/s m
n	Mol-Anteile im Brennstoff (Kohlenstoff)	—
o	Mol-Anteile im Brennstoff (Sauerstoff)	—
p	Druck	Pa
p_{CO}	Kohlenmonoxid-Partialdruck	Pa
p_{CO_2}	Kohlendioxid-Partialdruck	Pa
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	Wasserdampf-Partialdruck	Pa
p_{H_2}	Wasserstoff-Partialdruck	Pa
r	Strahlungsabstand	m
s_{O_2}	stöchiometrischer Sauerstoffbedarf	kg/kg
t	Zeitvariable	s
v	Geschwindigkeit	m/s
x	Koordinate der Tunnelachse	m
x	Massenkonzentration	kg/kg
x_d	spezifisches Rauchpotential, Verbrennung	m^2/kg
x_s	spezifisches Rauchpotential, Verschwelung	m^2/kg
y	Koordinate der Tunnelhöhe	m
z	Koordinate der Tunnelbreite	m
z_i	Unterteilung des Plume	m

Zeichen	Erklärung	Dimension
<u>Griechische Buchstaben</u>		
Θ	Übertemperatur ($T - T_u$)	K
Δ	Differenz-Symbol	—
Φ	Kontraktionszahl	—
α	Wärmeübergangskoeffizient	—
β	Strahlungswinkel	—
$\delta(x)$	Dicke der Mischungsschicht als Fkt. (x)	m
ζ	Widerstandsbeiwert	—
η	dynamische Viskosität	kg/m s
λ	Wellenlänge	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m K
λ_{O_2}	Sauerstoffverhältniszahl	—
ξ	Widerstandsbeiwert der Wandreibung	—
ϱ	Dichte	kg/m ³
σ	Extinktionskoeffizient nach BEER	1/m
φ	relative Luftfeuchtigkeit	—

Zeichen	Erklärung
---------	-----------

Indizes

0	Bezugsgröße
1	die 1. Segmentierung betreffend
2	die 2. Segmentierung betreffend
3	die 3. Segmentierung betreffend
B	den Boden, die Bodenöffnung betreffend
D	die Decke, Deckenöffnung betreffend
G	die Heißgasschicht betreffend
K	konvektiv
L	die Kaltgasschicht betreffend
P	den Plume betreffend
S	Strahlung
V	einer vertikalen Ventilationsöffnung zugeordnet
calc.	berechnet
e	eingemischt (Plume)
h	charakteristische Länge (Schichthöhe)
i, j, k	Zählindizes
krit	kritisch
max	maximal
mess	gemessen
n	in Normalenrichtung
res	resultierend
tr	trocken
u	Umgebungszustand
z	zwangsventiliert
'	Teilstrom aus der Heißgasschicht

1 Einleitung

Beim Ausbau des europäischen Verkehrsnetzes wird ein zunehmender Anteil der Strecken als Tunnel gebaut, so daß in den nächsten Jahren mit der Fertigstellung einer ganzen Reihe neuer Tunnelbauwerke zu rechnen ist. Die bedeutendsten Bauwerke im europäischen Raum sind dabei

- der Kanaltunnel (Eisenbahn) zwischen England und Frankreich mit einer Länge von ca. 50 km und
- der Belttunnel (Eisenbahn) in Dänemark zwischen den Inseln Fünen und Seeland mit etwa 7 km Länge.

Daneben befinden sich mehrere Großprojekte im Planungsstadium, z.B.

- die Alpenquerung (Brenner-Basistunnel) für den Bahnverkehr in Österreich/Italien mit ca. 50 km Länge,
- der Lötschbergtunnel und der Gotthardbasistunnel in der Schweiz mit ca. 30 km bzw. 50 km Länge und
- der Tunnel bei Gibraltar zwischen Spanien und Marokko, ebenfalls mit einer geplanten Länge von ca. 50 km.

Neben diesen Großprojekten werden eine Reihe mehr regional bedeutender Tunnel geplant und gebaut, so daß unter Einbeziehung aller Neubaumaßnahmen das gesamteuropäische Netz an Verkehrstunneln im Jahr 2000 eine Gesamtlänge von weit über 10 000 km erreichen dürfte [9].

Angesichts dieses wachsenden Tunnelbestandes und einiger aufsehenerregender Brandereignisse in Tunnelbauwerken - wie z.B. 1987 der Brand in der Londoner U-Bahnstation Kings Cross mit 31 Toten und über 100 Verletzten sowie 1991 der Brand im innerstädtischen Nahverkehrsnetz der Stadt Zürich mit 58 Verletzten - wurde in den letzten Jahren vermehrt die Problematik des vorbeugenden baulichen Brandschutzes in Verkehrstunneln und Fragen des abwehrenden Brandschutzes, insbesondere unter Berücksichtigung der erschwerten Flucht- und Rettungsmöglichkeiten in langgestreckten Tunnelanlagen, diskutiert.

Lösungsmöglichkeiten wurden dabei zunehmend unter Zuhilfenahme von rechnerischen Verfahren erarbeitet, wobei aber die experimentelle Bestätigung der theoretisch ermittelten Ergebnisse weitgehend fehlte. Zur Absicherung der Rechenergebnisse mußten z.B. die berechneten Temperaturverläufe mit Temperaturwerten verglichen werden, die nach einem Brand aus den aufgetretenen Schäden am Bauwerk abgeleitet werden konnten (Betonzermürbung, Restfestigkeit der Bewehrung). Zur Kontrolle der berechneten

Rauchentwicklungen wurde u.a. auf Meßdaten aus Experimenten im österreichischen Zwenbergtunnel zurückgegriffen. Da bei diesen Experimenten als Brandgut Benzin verwendet wurde, konnte eine Absicherung der Rechenergebnisse für Brände mit realistischen Brandlasten in Form von Schienen- oder Straßenfahrzeugen nur in erster Näherung vorgenommen werden.

Eine wesentliche Erweiterung des vorhandenen Versuchsmaterials stellen Meßergebnisse dar, die im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens [3] erarbeitet wurden, bei dem in den Jahren 1990 bis 1992 in einem stillgelegten Tunnel in Norwegen insgesamt 20 Brandversuche mit realistischen Brandlasten durchgeführt wurden. Als Brandlasten dienten Schienen- (U-Bahn-, D-Zug-, IC- und ICE-Reisezugwagen) und Straßenfahrzeuge (Pkw's, Reisebus, Lkw). Für Parameterstudien und, um Anbindung an früher durchgeführte Brandversuche zu erhalten, wurde bei einigen Brandversuchen auch Holzkrippen und Heptan als Brandlast eingesetzt.

Ziel der Brandversuche war die Feststellung der Heiß- und Rauchgasbewegungen sowie die Verteilung eventuell gesundheitsgefährdender Brandrückstände im Tunnel. Neben der Weiterentwicklung und Absicherung von Rechenmodellen sollen anhand der gewonnenen Meßergebnisse in Zusammenarbeit mit Behörden und Feuerwehren Flucht- und Rettungskonzepte entwickelt sowie Maßnahmen zur sachgemäßen Entsorgung der ausgebrannten Fahrzeuge und zur Wiederinbetriebnahme brandbelasteter Tunnelanlagen aufgezeigt werden.

Ziel des vorliegenden, vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BMBau) geförderten Forschungsvorhabens war die rechnerisch theoretische Auswertung der Rauch- und Heißgas-Phänomene, die bei Fahrzeugbränden im Tunnel auftreten. Dafür stand das Rechenprogramm FIGARO (Fire and Gas Movements in Rooms) zur Verfügung, das zwischen 1988 und 1990 von HEINS im Rahmen des vom BMBau finanziell unterstützten Forschungsvorhabens „Untersuchungen über die Brand- und Rauchentwicklung in unterirdischen Verkehrsanlagen - Katastrophenschutz in Verkehrstunneln“ [10] entwickelt wurde.

Um die experimentelle Datenbasis für die rechnerisch theoretische Auswertung zu vergrößern, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zunächst die apparative Ausrüstung im Tunnel, insbesondere diejenige zur Messung der Rauchgasdichte, erweitert.

Nach Abschluß der experimentellen Arbeiten wurden dann ausgewählte Brandversuche mit dem Rechenprogramm FIGARO nachgerechnet; diese Arbeiten dienen

- zur Verifikation des Rechenprogramms,
- zum Parameterstudium maßgebender Modellgrößen (Segmentierung, Ventilationsbedingungen, usw.) und schließlich
- zur angestrebten rechnerisch theoretischen Auswertung der Rauch- und Heißgas-Phänomene.

Selbstverständlich muß vor einer Übertragung der Versuchs- und Rechenergebnisse auf andere Tunnel ein sorgfältiger Vergleich mit den baulichen Gegebenheiten des Versuchstunnels in Norwegen vorgenommen werden. Beispielsweise war der Versuchstunnel in Norwegen nicht ausgekleidet und besaß deshalb eine relativ stark zerklüftete Oberfläche im Wand- und Deckenbereich; daneben müssen bei der Bewertung der Versuchsergebnisse die nicht konstanten Querschnittsabmessungen in Tunnellängsrichtung und die hohe Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden.

2 Grundlagen

2.1 Vergleichsrechnungen mit dem Modell

In [10] hat HEINS das Programm FIGARO anhand von drei 1974 im Zwenbergtunnel (Österreich) [11] und einem 1986 in Finnland [12] durchgeführten Brandversuchen überprüft.

Bei den in Österreich durchgeführten Versuchen sollte der Einfluß von verschiedenen Tunnelventilationssystemen auf die Ausbreitung der Brandgase und die Entwicklung des Brandes untersucht werden. Die Ventilation wurde unterschieden in freie Ventilation, Frischlufteinblasung über der Tunnelsohle mit Heißgasabsaugung unter der Decke (Querlüftung), sowie einer Halbquerlüftung, bei der eine Heißgasabsaugung unter der Decke stattfand, die Frischluft aber über die Tunnelportale zugeführt wurde. Um die beiden letztgenannten Lüftungssysteme zu realisieren, wurde in den Tunnel eine Zwischendecke eingezogen. Als Brandlast wurde Benzin eingesetzt. Die freie Strömungsfläche hatte einen nahezu rechteckigen Querschnitt (ca. 20 m²). Das Südportal des 390 m langen Zwenbergtunnels wurde zwecks Unterdrückung nicht kontrollierbarer Windeinflüsse auf das Brandgeschehen verschlossen. Es zeigten sich für die Temperatur in der Heißgasschicht T_G und der Kaltgasschicht T_L , sowie der CO₂-Konzentration eine relativ gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Der Brandversuch mit freier Ventilation und ohne Heißgasabsaugung entspricht annähernd den Bedingungen, die im norwegischen Tunnel vorgelegen haben.

Der Versuch in dem rd. 140 m langen finnischen Tunnel simulierte einen Verkehrsstau in einem Kfz-Tunnel. Als Brandlast wurden acht Holzkrippenstapel hintereinander aufgebaut, wobei untersucht wurde, ob ein Feuerübersprung auf die umgebenden „Pkw“ stattfindet. Der Tunnel war wie der Zwenbergtunnel einseitig verschlossen. Die Querschnittsfläche betrug rd. 26 m². Mit einem Frischluftgebläse wurde eine Längsströmung von ca. 0.2–0.3 m/s erzeugt.

Für die Heiß- und Kaltgastemperaturen wurden gute Übereinstimmungen festgestellt; für die Gaskonzentrationen (CO, CO₂ und O₂) ergaben sich deutliche Abweichungen.

2.2 Theoretische Grundlagen

2.2.1 Beschreibung des Zonenmodelles

Das Programm, mit dem die Vergleichsrechnungen ausgeführt werden sollen, beruht auf der Grundlage eines Zwei-Schicht-Zonen-Modelles, welches mehrere quaderförmige Räume bzw. Raumsegmente bei der Berechnung berücksichtigen kann. Zum Beispiel werden langgestreckte Bauwerke, wie beispielsweise ein Tunnel, durch Schnitte in mehrere Raumsegmente (kurz: Raum) unterteilt. Die Raumgrenzen werden durch die Umfassungsbauteile bzw. Ventilationsöffnungen (z.B. Türen, Fenster oder Schnittflächen) gebildet.

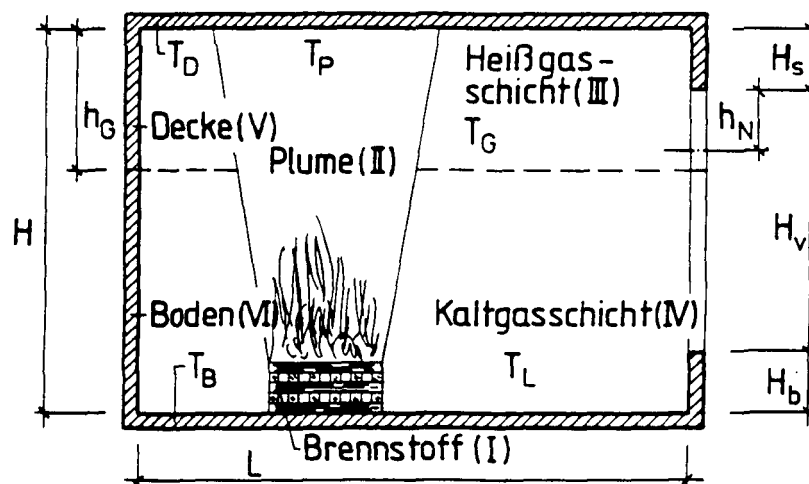


Abbildung 2.1: Zonenaufteilung im Modell Figaro

Das Modell unterteilt einen Raum in die vier Zonen **III** bis **VI**. Befindet sich in einem Raum der Brandherd, so treten zwei weitere Zonen hinzu (**I** und **II**). Diese 6 Zonen lassen sich im einzelnen als

- I Der **Brennstoff**, von dem die Pyrolysegase ausgehen
- II Die als **Plume** aufsteigenden Brandgase einschließlich der eingemischten Luft
- III Die **Heißgasschicht**
- IV Die **Luft- oder Kaltgasschicht**
- V Die **Deckenzone**; der Bereich der Tunnelwände, die die Heißgasschicht nach oben und zu den Seiten hin begrenzt
- VI Der **Boden**; analog zur Deckenzone der Bereich, der mit der Kaltgasschicht in Kontakt ist

kennzeichnen.

2.2.1.1 Der Brennstoff

Im Brandherd wird die Energie durch den Abbrand des Brennstoffes freigesetzt. Das Maß hierfür ist die Energiefreisetzungsrate \dot{E} , die im vorliegendem Programm durch

$$\dot{E} = H_u \dot{M}_L \frac{x_{O_2}}{s_{O_2}} \quad (2.1)$$

modelliert wird. In diese Gleichung gehen Stoffwerte mittels unterem Heizwert H_u sowie der stöchiometrische Sauerstoffbedarf s_{O_2} des Brandgutes ein. Als Versuchsparameter werden der dem Brandherd zugeführte Luftmassenstrom \dot{M}_L mit dessen

Sauerstoffgehalt x_{O_2} benötigt. Sind diese Versuchsdaten nicht bekannt, so kann \dot{E} über die Pyrolyserate \dot{R} in die Berechnung eingeführt werden. Für diesen Fall gilt die Beziehung

$$\dot{E} = \dot{R} \cdot H_u \quad (2.2)$$

Die Pyrolyserate kann mit einer Abbrandwaage im Brandversuch ermittelt werden. HEINS [10] gibt in seinem Bericht ein Beispiel für den Verlauf einer Abbrandrate. Diese Abbrandrate ist in Abb. 2.2 dargestellt; sie wurde bei Brandversuchen im Freien an einem Stockholmer U-Bahnwagen [21] gemessen.

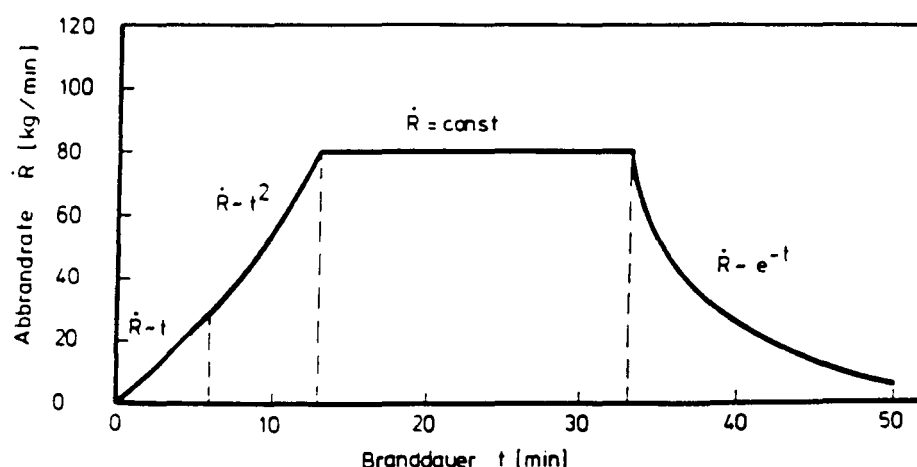


Abbildung 2.2: Abbrandrate eines U-Bahnwagens

Zu Beginn des Brandes wurde ein linearer Anstieg gemessen, der in einen quadratischen Anstieg überging, sobald sich der Brand räumlich ausbreitete. Diese beiden Abschnitte werden in der Regel als Brandentstehungsphase bezeichnet; während der Brandentstehungsphase ist der Abbrandverlauf i.a. brandlastgesteuert.

Als dritter Abschnitt schloß sich nach dem FLASHOVER eine ventilationsgesteuerte Phase an, während der eine konstante Abbrandrate gemessen wurde. Diese Phase wird in der Regel als stationäre Brandphase bezeichnet. Kennzeichnend ist in dieser Zeitspanne, daß die Abbrandrate vom Sauerstoffangebot gesteuert wird, wodurch es bei einer Minderversorgung mit Sauerstoff zu einer unvollständigen Verbrennung und deswegen zur Bildung von Kohlenmonoxid kommen kann.

Als letzter Abschnitt folgte die brandlastgesteuerte Abkling- oder Ausbrandphase, während der die Abbrandrate einer abfallenden Exponentialfunktion ähnelte.

2.2.1.2 Das Plume-Modell

Durch den Plume wird ein Massenstrom in die Heißgasschicht befördert, der sich aus Brandgasen und eingemischter Umgebungsluft zusammensetzt. Da die Strömungsgeschwindigkeiten im Plume höhenabhängig sind, werden die Vorgänge im Plume für

kleinere Segmente betrachtet. So ergibt sich bei Benutzung des Modelles nach ZUKOSKI [24] für den eingemischten Massenstrom je Segment

$$\dot{M}_{e,i} = f \cdot \varrho_i \sqrt{\frac{\varrho_i - \varrho_{p,i}}{\varrho_i} \cdot g (z_i^{2.5} - z_{i-1}^{2.5})} \quad (2.3)$$

Hierzu wird der Abstand zwischen Brandherd und Raumdecke in mindestens zwei Segmente i unterteilt. Der gesamte Plume-Massenstrom ergibt sich aus der Summe der Einzelströme von Gl.(2.3). In dieser Gleichung ist nach ZUKOSKI für den Entrainmentkoeffizienten $f = 0.08$ einzusetzen. Die Umgebungstemperatur hat über die Dichte der eingemischten Luft ϱ_i Einfluß auf den Plumestrom. Die Höhe der Segmentgrenzen über dem Boden wird mittels z_i angegeben.

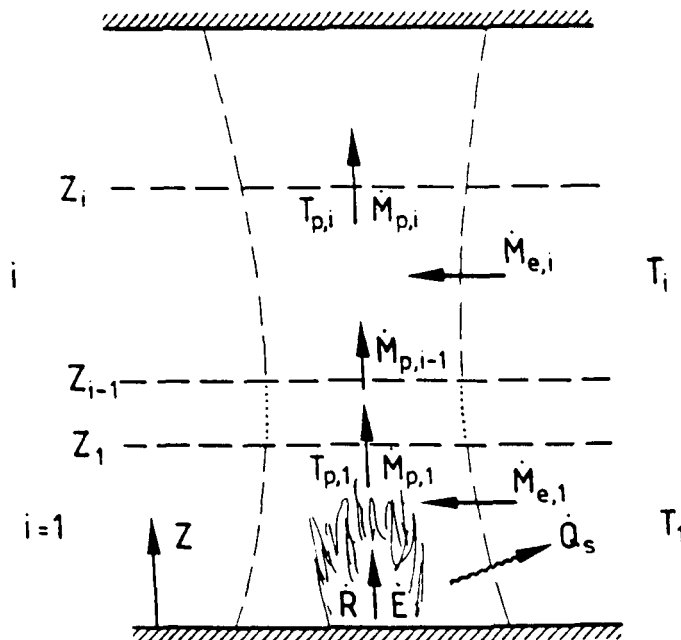


Abbildung 2.3: Segmentierung des Plumes

2.2.1.3 Die Heißgasschicht

Die Heißgasschicht steht mit ihrer Umgebung im Massen- und Energieaustausch. Die Formulierung des ausgetauschten Massenstromes ergibt

$$\begin{aligned} \frac{dM_G}{dt} &= \dot{M}_P + \dot{M}_{LG} - \dot{M}_{GL} - \dot{M}_D \\ &\quad + \sum_j \left[(\dot{M}_{GG} + \dot{M}_{LG})_{ji} - (\dot{M}_{GG} + \dot{M}_{GL})_{ij} \right] \quad (2.4) \\ \text{mit } \frac{dM_G}{dt} &= \frac{d(\varrho_G h_G)}{dt} \cdot A. \end{aligned}$$

In der Gl.(2.4) wird mit dem Index „i“ der aktuelle Raum, und mit „j“ der daran anschließende bezeichnet. Ein Index wie z.B. „GL“ gibt an, daß sich der Massenstrom

von der Heißgasschicht in die Kaltgasschicht bewegt. Aus den Massenströmen ergeben sich mittels der Beziehung

$$\dot{H} = \dot{M} \bar{c}_p \Theta \quad (2.5)$$

die Energieströme/Enthalpieströme. So gilt für den resultierenden Enthalpiestrom in die Heißgasschicht:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{G,res} = & (\dot{M} c_p \Theta)_P + \dot{M}_{LG} (c_p \Theta)_{L,i} \\ & + \sum_j \left[\dot{M}_{GG,ji} (c_p \Theta)_{G,j} + \dot{M}_{LG,ji} (c_p \Theta)_{L,j} \right] \\ & - \left\{ \sum_i [\dot{M}_{GG} + \dot{M}_{GL}]_{ij} + \dot{M}_{GL} + \dot{M}_D \right\} \cdot (c_p \Theta)_{G,i} . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Um die Energiebilanz der Heißgasschicht zu vervollständigen, müssen noch die Wärmeströme \dot{Q} aus Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden, woraus sich ergibt:

$$\begin{aligned} \frac{dE_G}{dt} &= \dot{H}_{G,res} + \dot{Q}_{S,P-G} - \sum_j \dot{Q}_{S,G,ij} - \dot{Q}_{S,G-B} - \dot{Q}_{S,G-D} - \dot{Q}_{K,G-D} \quad (2.7) \\ \text{mit } \frac{dE_G}{dt} &= \frac{d(\rho_G h_G c_{pG} \Theta_G)}{dt} \cdot A . \end{aligned}$$

Die Wärmeströme mit „S“ als ersten Index bezeichnen den durch Strahlung erbrachten Anteil. Die am Austausch der Energie beteiligten Partner werden z.B. durch „G-B“ (Heißgasschicht - Boden) gekennzeichnet. Index „K“ steht für konvektiven Wärmeaustausch.

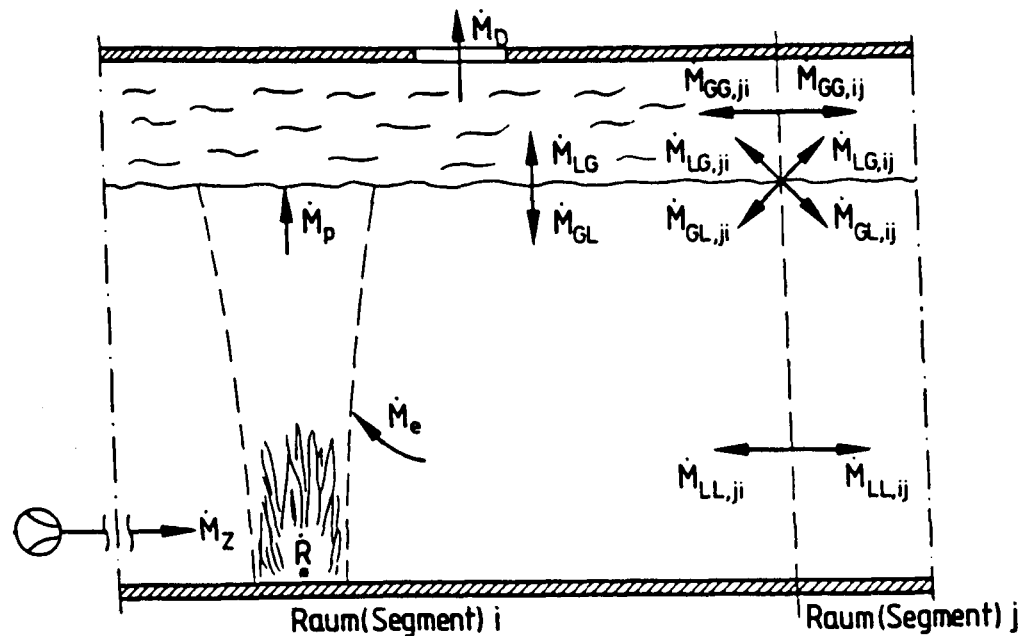


Abbildung 2.4: Massenströme in einem Raum

2.2.1.4 Die Kaltgasschicht

Ähnlich wie bei der Heißgasschicht werden die Massen- und Energiebilanzen für die Kaltgasschicht formuliert. Speziell gilt für die Massenbilanz

$$\frac{dM_L}{dt} = \dot{M}_z - \dot{M}_e + \dot{M}_{GL} - \dot{M}_{LG} + \sum_j \left[(\dot{M}_{LL} + \dot{M}_{GL})_{ji} - (\dot{M}_{LL} + \dot{M}_{LG})_{ij} \right] \quad (2.8)$$

mit

$$\frac{dM_L}{dt} = \frac{d(\rho_L h_L)}{dt} \cdot A.$$

Für die mit dem Massenaustausch verbundenen Energieströme folgt daraus

$$\begin{aligned} \dot{H}_{L,res} = & (\dot{M} c_p \Theta)_z + \dot{M}_{GL}(c_p \Theta)_{G,i} \\ & + \sum_j \left[\dot{M}_{LL,ji}(c_p \Theta)_{L,j} + \dot{M}_{GL,ji}(c_p \Theta)_{G,j} \right] \\ & - \left\{ \sum_j [\dot{M}_{LL} + \dot{M}_{LG}]_{ij} + \dot{M}_e + \dot{M}_{LG} \right\} \cdot (c_p \Theta)_{L,i}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Weil die Kaltgasschicht mit dem Boden im konvektiven Wärmeaustausch steht, lautet die Gesamtenergiebilanz für die Kaltgasschicht

$$\begin{aligned} \frac{dE_L}{dt} &= \dot{H}_{L,res} + \dot{Q}_{K,B-L} \\ \text{mit } \frac{dE_L}{dt} &= \frac{d(\rho_L h_L c_{pL} \Theta_L)}{dt} \cdot A. \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.2.1.5 Umfassungsbauteile Decke und Boden

Die Wärmeströme in/aus Decke (D) und Boden (B) der dem Brand zugewandten Seite werden durch die folgenden Gleichungen bilanziert:

$$\dot{Q}_{D,res} = \dot{Q}_{S,P-D} + \dot{Q}_{S,G-D} + \dot{Q}_{K,G-D} - \dot{Q}_{S,D-B} - \sum_j \dot{Q}_{S,D,ij} \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{B,res} = \dot{Q}_{S,P-B} + \dot{Q}_{S,G-B} + \dot{Q}_{S,D-B} - \dot{Q}_{K,B-L} - \sum_j \dot{Q}_{S,B,ij} \quad (2.12)$$

2.2.2 Vertikale Ventilationsöffnungen

Bei vertikalen Öffnungen handelt es sich um Türen, Fenster oder, wie im vorliegenden Fall, um Schnittflächen, die durch die Segmentierung des Tunnels in mehrere Räume entstanden sind. Die Schnittflächen werden als eine Tür angesehen, die sich über die gesamte Raumbreite und -höhe erstreckt. Die Geschwindigkeit der Gasströmungen durch diese Schnittflächen ist bestimmt durch den Druckunterschied zwischen zwei benachbarten Räumen ($\Delta p_{ij}(h)$).

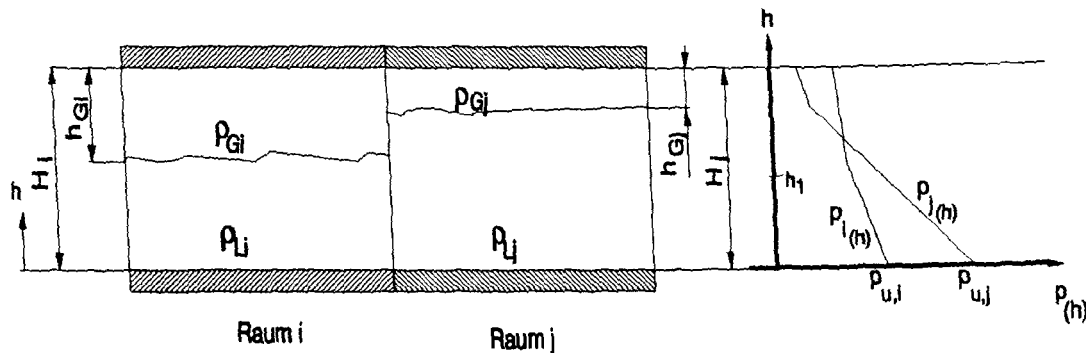


Abbildung 2.5: Druckverlauf $p(h)$ in Abhängigkeit von der Höhe (h)

Um die Druckdifferenz für eine beliebige Höhe h zwischen zwei Räumen zu berechnen, muß der Druckverlauf über der Höhe bekannt sein. Der Druck p_u eines Raumes wird aus den Massen- und Energiebilanzen berechnet. Der Druck $p(h)$ verringert sich nun mit der Höhenkoordinate h entsprechend Abb. 2.5 .

Beispielsweise ergibt sich im Raum i für die Höhe h_1

$$p_i(h_1) = p_{u,i} - \rho_{L,i} \cdot g \cdot h_1 \quad . \quad (2.13)$$

Allgemein läßt sich mit

$$p(h) = p_u - \rho(h) g h \quad (2.14)$$

die Druckdifferenz aufstellen als

$$\Delta p_{ij}(h) = p_i(h) - p_j(h) = (p_{u,i} - p_{u,j}) + g \cdot \int_0^h (\rho_j(h) - \rho_i(h)) dh . \quad (2.15)$$

Wegen der Annahme von homogenen Zuständen ist die Dichte innerhalb einer Schicht unabhängig von der Höhe, wodurch sich die Gl.(2.15) vereinfacht. Für die bekannte Druckdifferenz führt die BERNOULLI-Gleichung unter Berücksichtigung des Strömungsverluste zu folgender Gleichung:

$$v(h) = \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta p_{ij}(h)|}{\rho(1 + \zeta)}} . \quad (2.16)$$

Der Reibungsverlust der Strömung wird durch

$$\zeta = \xi \cdot \frac{L U}{4 A} \quad (2.17)$$

beschrieben. Die Strömungsweglänge L , angeströmte Fläche A und deren Umfang U sowie der von der REYNOLDS-Zahl abhängige Einfluß der Wandreibung ξ müssen hierzu vorliegen. Die Integration der Geschwindigkeit über die Querschnittshöhe h und der Breite des Strömungsquerschnittes B_v ergeben den Massenstrom

$$\dot{M} = \rho \Phi B_v \int_1^2 v(h) dh . \quad (2.18)$$

Die Kontraktionszahl Φ erlaubt eine Abschätzung des Einflusses einer Querschnittsverkleinerung auf den Massenstrom. Beispielsweise gilt für Tunnel $\Phi = 1$, weil die Durchtrittsfläche gleich der Querschnittsfläche des folgenden Segments ist.

2.2.3 Stoff- und Energieaustausch zwischen den Schichten

2.2.3.1 Vermischung bei geschichteter Strömung

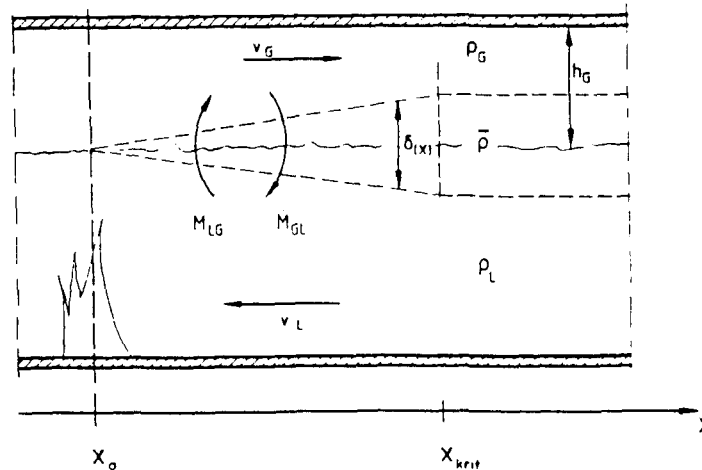


Abbildung 2.6: Bildung der Mischungszone zwischen Heiß- und Kaltgasschicht

Die Stabilität der Schichtung zwischen Heiß- und Kaltgasschicht ist ein Kriterium für den gegenseitig innerhalb einer Mischungszone ausgetauschten Massenstrom. Die Stabilität wird charakterisiert durch die dimensionslose RICHARDSON-Zahl

$$Ri_\delta = - \frac{g \delta(x) (\rho_G - \rho_L)}{\bar{\rho} \cdot (v_G - v_L)^2}, \quad (2.19)$$

hier in der Darstellung für ein Zonenmodell, bezogen auf die Heißgasschicht. Bei Unterschreiten einer kritischen RICHARDSON-Zahl Ri_{krit} (im Programm FIGARO $Ri_{krit} = 0.25$) kommt es zu verstärkten Instabilitäten und somit zu ansteigendem Stoffaustausch. Bei der Größe $\delta(x)$

$$\delta(x) = 0.23 \cdot x \quad (2.20)$$

handelt es sich um die vertikale Ausdehnung der Mischungszone, die mit wachsender Entfernung x zum Brandherd anwächst. Die horizontale Ausdehnung der Mischungszone ist gleich der Breite des Strömungsquerschnittes B_V . Für die ausgetauschten Massenströme gilt

$$d\dot{M}_{LG} = d\dot{M}_{GL} = e(Ri) \bar{\rho} B_V (v_G - v_L) dx. \quad (2.21)$$

Entscheidend für den Austausch ist die von der RICHARDSON-Zahl abhängige Größe

$$e(Ri) = e_0 \cdot \left[1 - \frac{Ri}{Ri_{krit}} \right]^2. \quad (2.22)$$

Im vorgestellten Modell wird mit $e_0 = 0.036$ und $Ri_{krit} = 0.25$ gearbeitet.

2.2.3.2 Verqualmung durch Rückvermischung

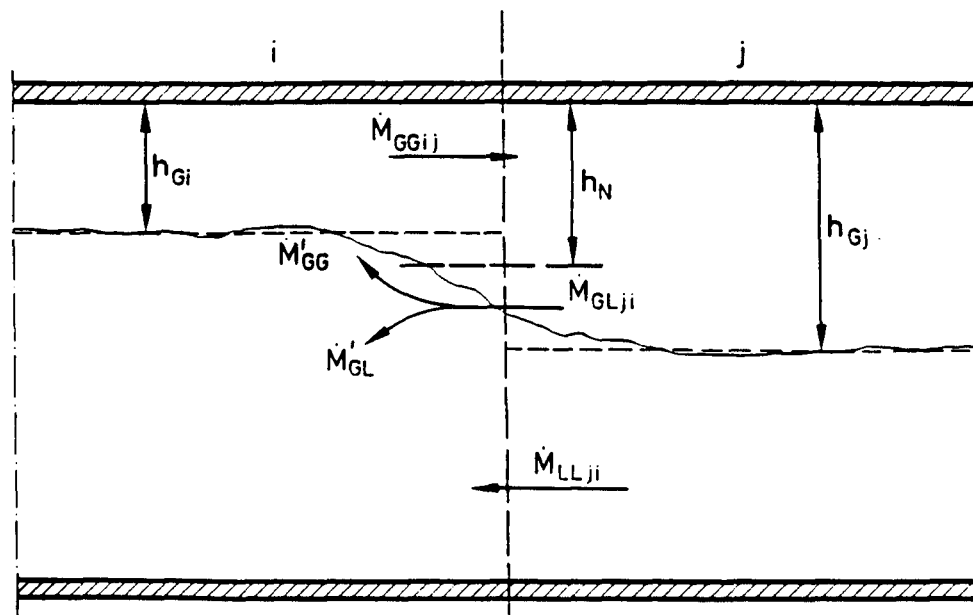


Abbildung 2.7: Rückvermischung von Heißgasen

In einem Abstand zum Brandherd kühlen die Brandgase ab, verlieren an Strömungsgeschwindigkeit und sinken zu Boden. Hierdurch werden die Heißgase von der zum Feuer strömenden Frischluft mitgerissen und trüben somit die Sicht in der Kaltgasschicht. Ein Mass für die Rückvermischung liefert die Gl.(2.23)

$$\dot{M}'_{GG,ji} = \frac{T_{Gj} - T_{L,i}}{T_{G,i} - T_{L,i}} \cdot \dot{M}_{GL,ji} \quad (2.23)$$

2.2.3.3 Strömungen an den Wänden

Auf- und Abtriebskräfte in der Grenzschicht an den Wänden werden durch Temperatur- und somit Dichteänderungen hervorgerufen. Dadurch kommt es zu Einmischungen von Heißgasen in die Kaltgasschicht und zu einer Verschlechterung der Sichtverhältnisse. Der Massenstrom \dot{m} entlang der Umfassungsbauteile könnte über die Gleichungen

$$\dot{m} = 1.755 \eta Gr_h^{0.25} \quad \text{laminar} \quad (2.24)$$

$$\dot{m} = 0.101 \eta Gr_h^{0.40} \quad \text{turbulent} \quad (2.25)$$

in die Berechnungen einfließen. Der Umschlag von einer laminaren in eine turbulente Wandströmung findet bei $Gr_h \geq 10^9$ statt. Diese theoretische Überlegung ist im vorliegenden Programm noch nicht implementiert.

2.2.4 Wärmeübertragung durch Konvektion

Aus der Heißgasschicht wird konvektiv Wärme an die Decke mit der Oberfläche

$$A_D = L \cdot B + 2 L \cdot h_G \quad (2.26)$$

übertragen, wohingegen die Kaltgasschicht mit der Bodenoberfläche

$$A_B = L \cdot B + 2 L \cdot (H - h_G) \quad (2.27)$$

im Wärmeaustausch steht. Mit dem NEWTONschen Abkühlungsgesetz lassen sich die Wärmeströme durch die folgenden Gleichungen

$$\dot{Q}_{K,L-B} = \alpha_B A_B (T_L - T_B) \quad (2.28)$$

$$\dot{Q}_{K,G-D} = \alpha_D A_D (T_G - T_D) \quad (2.29)$$

beschreiben.

2.2.5 Wärmeübertragung durch Strahlung

Der Strahlungsaustausch zwischen festen Körpern basiert im vorliegenden Programm FIGARO auf den Gesetzen idealer Strahler. So gilt für den zwischen den beiden Flächen A_i und A_j fließenden Energiestrom

$$\dot{Q}_{S,i \rightarrow j} = \dot{e}_n \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{r^2} dA_i dA_j. \quad (2.30)$$

Die beiden Teilflächen dA_i und dA_j haben den Abstand r voneinander. Die Winkel β_i und β_j werden aus dieser Verbindungslinie r und der jeweiligen Flächennormalen gebildet. Durch \dot{e}_n wird die flächenspezifische Strahlungsintensität in Richtung der Flächennormalen berücksichtigt.

2.3 Entstehung und Ausbreitung der Brandgase

In diesem Abschnitt sollen zwei Gefahrenquellen, die im Brandfall in einem Tunnel bestehen, aufgegriffen werden. Durch die Entstehung von Brandgasen erfolgt eine Verqualmung des Tunnelquerschnittes, wodurch die Auffindung von Fluchtwegen, bzw. der Zugang von Rettungsmannschaften erschwert wird. Zum anderen können während der Verbrennung toxische Gase entstehen. Zum Beispiel besteht in der ventilationsgesteuerten Vollbrandphase die Gefahr der Bildung von Kohlenmonoxid CO. Dieses Gas entsteht verstärkt, wenn die vorhandene Sauerstoffmenge geringer als die zur vollständigen Verbrennung benötigte ist.

2.3.1 Sichtbehinderung durch Rauchpartikel

Zur Bewertung der Sichtbehinderung werden vom vorliegenden Modell nur die optischen Eigenschaften¹ der Brandgase beschrieben. Maßstäblich wird dazu der durch

¹Eine Reizwirkung auf z.B. die Augen wird nicht berücksichtigt.

das BEERsche Gesetz

$$k(\lambda) = -\frac{dI(\lambda)}{I_0(\lambda)dx} \quad (2.31)$$

beschriebene Extinktionskoeffizient k eingesetzt. Der Extinktionskoeffizient ist abhängig von der Wellenlänge λ des eingesetzten Lichtes. Der Quotient dI/I_0 gibt die von der Gasschicht absorbierte Lichtintensität dI bezogen auf die Ausgangsstärke I_0 wieder. Weiterhin hat die durchstrahlte Wegstrecke dx Einfluß auf den Extinktionskoeffizienten. Nach Östmann [16] gilt für den Extinktionskoeffizienten k

$$k = D \cdot \ln(10), \quad (2.32)$$

wobei gilt:

$$D = \frac{1}{dx} \cdot \log \frac{I_0}{I}. \quad (2.33)$$

Die Gl.(2.32) gilt genau genommen nur für monochromatisches Licht. Doch werden die o.a. Gleichungen auch häufig trotz geringer Abweichungen bei weißem Licht eingesetzt. Die Einheit für den Extinktionskoeffizienten ist $[m^{-1}]$.

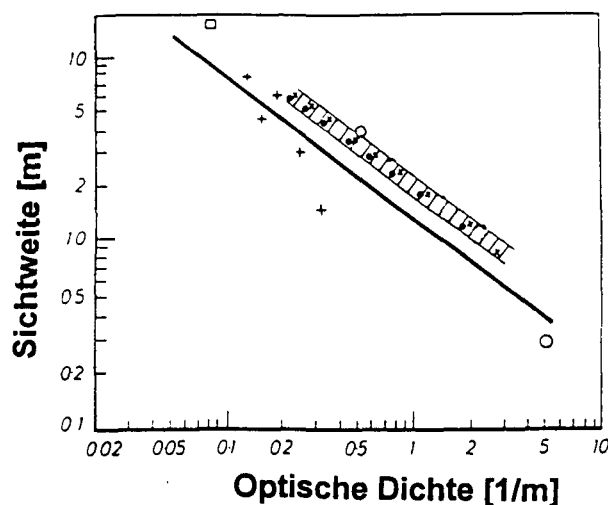


Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Optischer Dichte und Sichtweite nach [8]

Die von der Quelle ausgehenden Lichtstrahlen werden sowohl absorbiert, als auch reflektiert. Die Absorptionsrate ist bei schwarzem Rauch größer und der reflektierte Anteil kleiner als bei hellem Rauch. Beide Anteile sorgen dafür, daß die Sichtweite beeinträchtigt wird. Das Verhältnis von Wellenlänge des Lichtes zu Rauchpartikeldurchmesser und deren Anzahl haben ebenfalls einen Einfluß auf den Extinktionskoeffizienten.

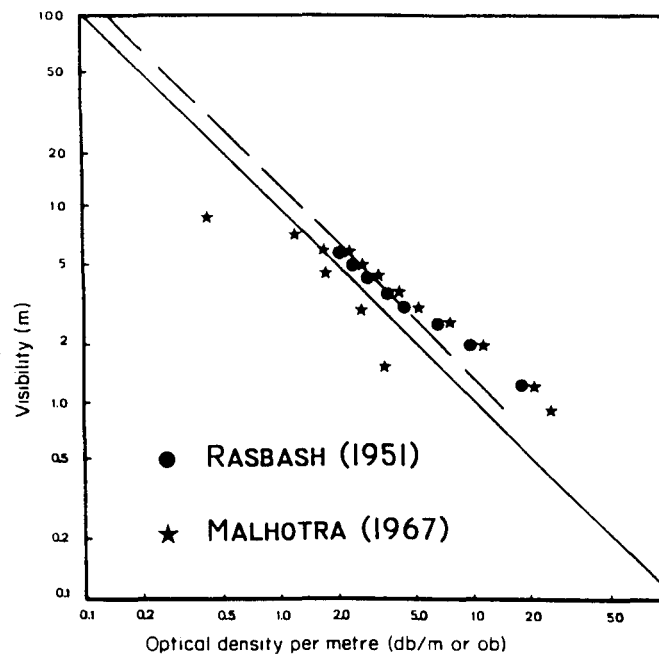


Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen optischer Dichte und Sichtweite bei mäßiger Beleuchtung nach DRYSDALE [7]

Eine Bewertung der optischen Dichte hängt von weiteren Faktoren ab. So kommen EGRESI ET. AL. [8] zu einer anderen Korrelation zwischen der optischen Dichte und der Sichtweite, als DRYSDALE [7]. Aus Abb. 2.8 und Abb. 2.9 geht hervor, daß auch die Helligkeit der Umgebung sowie die Beschaffenheit von Schildern, deren Sichtbarkeit geprüft wird, eine ausschlaggebende Bedeutung haben.

Im Rechenprogramm FIGARO wird mit Hilfe der Massenbilanzen der Extinktionskoeffizient berechnet. Dazu werden zunächst die Massenkonzentrationen x_k der einzelnen Bestandteile sowie deren Rauchpotentiale x_d in den Schichten bestimmt.

So ergibt sich für die Heißgasschicht:

$$\begin{aligned} \frac{d(x_{k,G}M_G)}{dt} &= x_{k,L}\dot{R} + x_{k,L}(\dot{M}_e + \dot{M}_{LG}) + \sum_j [\dot{M}_{GG,ji}(x_k)_{G,j} + \dot{M}_{LG,ji}(x_k)_{L,j}] \\ &\quad - \left\{ \sum_j [\dot{M}_{GG} + \dot{M}_{GL}]_{ij} + \dot{M}_{GL} + \dot{M}_D \right\} \cdot x_{k,G} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Für die Kaltgasschicht ergibt sich die Gleichung

$$\begin{aligned} \frac{d(x_{k,L}M_L)}{dt} &= x_{k,G} \cdot \dot{M}_{GL} \\ &\quad + \sum_j [\dot{M}_{LL,ji}(x_k)_{L,j} + \dot{M}_{GL,ji}(x_k)_{G,j}] \\ &\quad - \left\{ \sum_j [\dot{M}_{LL} + \dot{M}_{LG}]_{ij} + \dot{M}_e + \dot{M}_{LG} \right\} \cdot x_{k,L} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Die Umrechnung der Massenkonzentration in eine Volumenkonzentration [Vol.-%] erfolgt über die Beziehung

$$V_k = x_k \frac{\text{Mol}_{tr}}{\text{Mol}_k} \cdot 100 \quad (2.36)$$

Mit Mol_{tr} wird das Molekulargewicht des trockenen Gases bezeichnet. Der Extinktionskoeffizient k ergibt sich nun aus der Gleichung

$$k = x_d \varrho \quad (2.37)$$

2.3.2 Bildung toxischer Verbrennungsgase

Die Bildung von Verbrennungsgasen läßt sich i.a. über die Formel



beschreiben. Die Verbrauchs- bzw. Entstehungsraten X_k der einzelnen Komponenten k ergeben sich aus

$$X_k = f_k \frac{\text{Mol}_k}{\text{Mol}_{Br}} \quad (2.39)$$

Mit Mol_k wird die Molekularmasse der Reaktionsteilnehmer, mit Mol_{Br} die Molekularmasse des Brandgutes bezeichnet. Die Vorschriften zur Berechnung der Werte f_k ist [10] zu entnehmen.

Voraussetzung für diese Art der Berechnung ist, daß die Zusammensetzung des Brandgutes in der Form $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_o$ bekannt ist.

Bei ausreichendem Sauerstoffangebot (z.B. in einer brandlastgesteuerten Phase) ist mit einer fast vollständigen Verbrennung ohne CO-Bildung zu rechnen ($f_2 = f_4 = 0$).

Bei unzureichendem Sauerstoffangebot vergrößert sich die Entstehungsrate von Kohlenmonoxid, wobei der CO-Bildung der Mechanismus der homogenen Wassergasreaktion



zugrundegelegt wird. Die Gleichgewichtskonstante der homogenen Wassergasreaktion

$$K = \frac{[\text{pCO}][\text{pH}_2\text{O}]}{[\text{pCO}_2][\text{pH}_2]} \quad (2.41)$$

wird aus den Partialdrücken der Reaktionspartner bestimmt und liegt tabellarisch für den Temperaturbereich von 500 °C bis 1500 °C vor.

3 Versuchstunnel und Meßtechnik

3.1 Beschreibung des Tunnels

Der Tunnel liegt in Nord-Norwegen, 50 km südlich von Hammerfest am Repparfjord. Es handelt sich um einen Transporttunnel einer stillgelegten Eisenerzmine. Der Tunnel ist durch Sprengungen in den Berg getrieben und danach nicht ausgebaut, so daß die zerklüftete Oberfläche des Gesteines erhalten geblieben ist. Vor- und Rücksprünge in der Tunneloberfläche können bis 0.2 m erreichen.

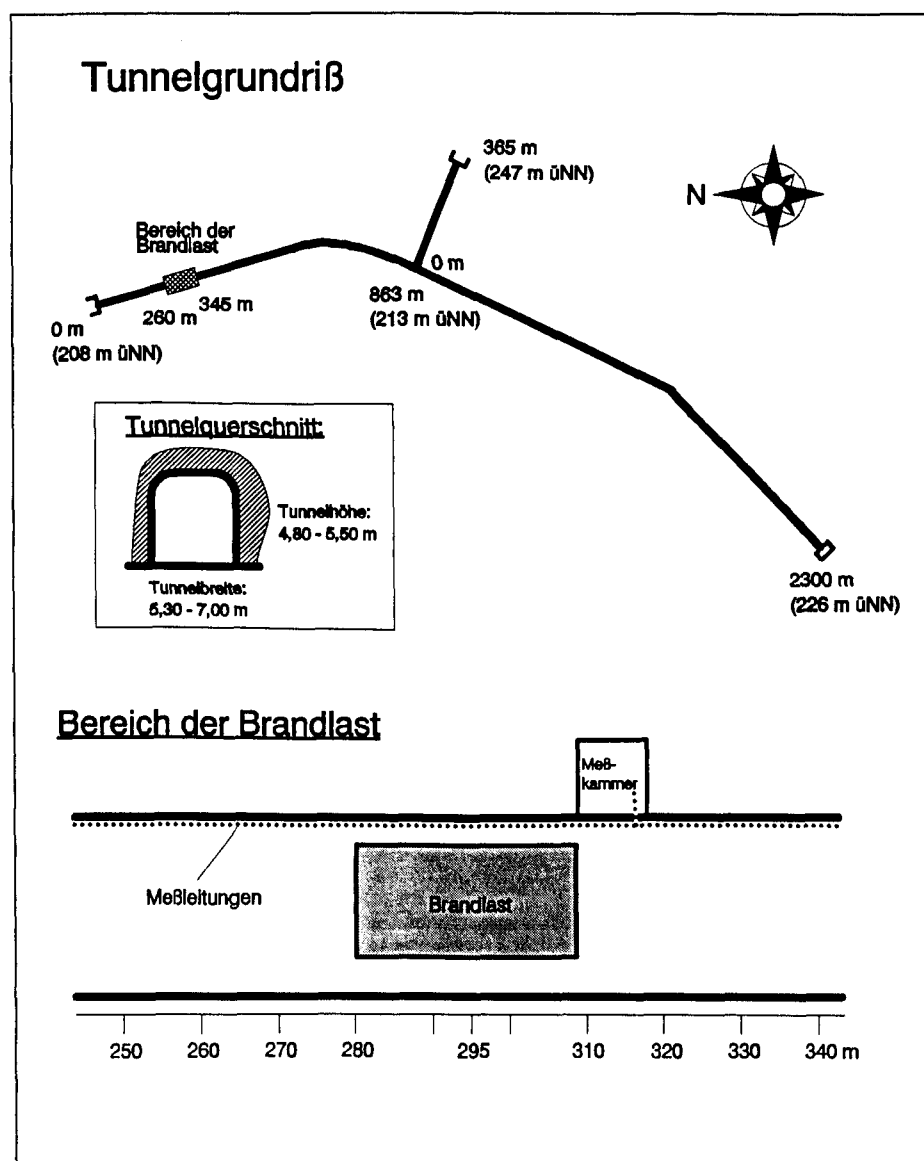


Abbildung 3.1: Tunnelgrundriß

Das Eingangsportal am nördlichen Kopf liegt 208 m üNN (Abb. 3.1). Nach einer Länge von 2300 m erreicht der Tunnel eine Höhenlage von 226 m üNN. Hier endet der Tunnel mit einem Stichschacht zur Oberfläche. In einer Entfernung von 863 m vom Portal (213 m üNN) geht in Richtung Osten ein 365 m langer Seitenstollen ab, der auf der geodätischen Höhe von 247 m üNN aus dem Berg herausführt.

Der Tunnel hat eine Breite von 5.30 bis 7.00 m und eine Höhe zwischen 4.80 und 5.50 m. Für die im Tunnel verkehrenden Fahrzeuge wurden Ausweichstellen eingerichtet, so daß eine Verbreiterung kurz hinter dem Portal, eine weitere bei der Abzweigung des Seitenstollens liegt.

Zur Orientierung wird ein Koordinatensystem eingeführt, dessen Nullpunkt sich an der Stelle der Brandlast auf dem Boden des Tunnels befindet, 295 m vom Portal entfernt. Die positive x-Richtung zeigt in den Tunnel hinein, die positive y-Richtung nach oben an die Decke. Der Tunnelboden besitzt immer den y-Wert 0, die Steigung wird hier nicht berücksichtigt. Der positive Ast der z-Achse zeigt nach rechts (vom Portal aus gesehen). Das Portal liegt bei $x = -295$ m, die Brandlast wird immer an der gleichen Stelle bei $x = 0$ m aufgebaut.

Am nördlichen Portal ist ein Ventilator zur Variation und Stabilisierung der Belüftung des Tunnels montiert. Dieser Ventilator verfügt über zwei Geschwindigkeitsstufen: halbe und volle Leistung. Im Zuleitungsrohr befinden sich mehrere Luken, mit denen die Zuluft gesteuert werden kann. Das Zuleitungsrohr mündet an einer Druckwand im Tunnel. Die Öffnung in der Druckwand kann durch Holzbalken zur „Feinregulierung“ vergrößert oder verkleinert werden. Die mit diesem Ventilator erzeugten Luftströmungen liegen zwischen 0 und 8 m/s im freien Tunnelquerschnitt.

3.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm von 1992 ist in der Tab. 3.1 zusammengestellt. Das Programm umfaßt 15 Brandversuche, die in dem Zeitraum vom 23. August bis 12. November 1992 durchgeführt wurden.

Datum	Brandversuch	Englischer Titel
23. Aug. 1992	Schulbus	Schoolbus
28. Aug. 1992	Holzkippenversuch Nr. 3	Woodcrib-test No. 3
30. Aug. 1992	Holzkippenversuch Nr. 4	Woodcrib-test No. 4
31. Aug. 1992	Holzkippenversuch Nr. 5	Woodcrib-test No. 5
13. Sep. 1992	Gekoppelte Waggon F2A1-F7	Joined railway car F2A1-F7
25. Sep. 1992	Eisenbahnwagen F2 St	Railway car F2 St
07. Okt. 1992	Eisenbahnwagen F1	Railway car F1
14. Okt. 1992	U-Bahnwagen F4 (Aluminium)	Subway car F4 (Alu)
23. Okt. 1992	Mischbrandlast (LF TIR)	Mixed fire load (LF TIR)
27. Okt. 1992	Heptan 1	Heptan tub fire No. 1
28. Okt. 1992	Heptan 2	Heptan tub fire No. 2
29. Okt. 1992	Heptan 3	Heptan tub fire No. 3
29. Okt. 1992	Heptan 4	Heptan tub fire No. 4
04. Nov. 1992	Pkw, neueres Modell	Plastic car
12. Nov. 1992	HF TIR	Heavy Goods Vehicle (HF TIR)

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm 1992

3.3 Meßausrüstung

Die Datenerfassungsanlage bestand aus drei SCHLUMBERGER ORION Data-Loggern, die sich während der Versuche in der Meßkammer im Tunnel nahe der Brandlast befanden (siehe Abb. 3.1). Hierhin wurden aus den Meßquerschnitten über elektrische Leitungen und Rohre (Gasanalyse) die Meßwerte übertragen. Kontrolliert wurden die Data-Logger über die serielle Schnittstelle von drei PC-Systemen, die außerhalb des Tunnels aufgestellt waren.

Während der Versuche waren sowohl die Meßgeräte als auch -leitungen einer aggressiven Umwelt ausgesetzt und mußten entsprechend geschützt werden. Damit z.B. die optischen Meßgeräte während der Versuche möglichst genaue Meßwerte liefern, wurde die Optik mit einer Luftspülung versehen.

Weiterhin bestand die Gefahr, daß Feuchtigkeit und Feststoffpartikel die Leitungsrohre der Gasanalyse verunreinigten. Deswegen wurden die Leitungen mit einem Gefälle zur Meßkammer hin installiert und am tiefsten Punkt mit einem Wasserabscheider versehen. Vor jedem Versuch wurden die Rohre mit Druckluft ausgeblasen.

Trotz dieser Vorkehrungen muß damit gerechnet werden, daß die Meßfehler größer sind, als bei Laborversuchen.

Die sehr langen Rohrleitungen der Gasanalyse erhöhten das Risiko, daß unter Umständen durch Leckstellen Nebenluft angesogen wurde. Wenn Nebenluft mit zum Gasanalysator gelangt, entstehen Fehlmessungen, wobei die Größe der Meßfehler nicht quantifiziert werden kann.

Um die Heißgas- und Rauchgasausbreitung in einem Brandversuch aufzuzeichnen, sind zum einen Temperaturmessungen, zum anderen Messungen der Rauchgasdichte nötig.

Der Begriff „Rauch“ wird von TROITZSCH [22] als eine sichtbare Suspension von festen und flüssigen Partikeln in der Luft definiert. Die Partikel rühren von der Verbrennung oder Pyrolyse her. Weil Rauch fast immer mit Brandgasen (Heißgasen) vermischt ist, besteht eine enge Kopplung zwischen der Rauch- und Heißgasausbreitung.

Die Ausbreitung der Heißgase kann über Temperaturveränderungen der Umgebung festgestellt werden. Die meßtechnische Erfassung der Rauchgasdichte erfolgt mit Meßgeräten, welche die Rauchgasdichte aus der Schwächung eines Lichtstrahles durch den Rauch quantifizieren. Aus diesen Daten können Rückschlüsse auf den Grad der Sichtbehinderung durch den Rauch gezogen werden.

Die sich vom Brandherd ausbreitenden Gase werden mit Gasanalysegeräten auf deren Zusammensetzung untersucht. Hauptsächlich werden die Konzentrationen von CO und CO₂ bestimmt.

Weil die Kenntnis der Strömungsgeschwindigkeiten von Heiß- und Kaltgasen zur Berechnung der ausgetauschten Massenströme notwendig sind, wurden diese ebenfalls aufgezeichnet.

Während der Brandversuche wurden folgende Größen gemessen:

Meßgröße	Meßzyklus	Einheit
Temperatur		
Thermoelement Typ K	60 / 15 sec	°C
Pyrometer	60 sec	°C
Gasgeschwindigkeit		
Bidirectional probe	15 sec	Pa
Flügelradanemometer	60 sec	m/s
Rauchentwicklung		
Transmission	60 sec	100 – 0 %
Optische Dichte	60 sec	0 – 3 V
Gasanalyse		
CO	90 sec	Vol. – %
CO ₂	90 sec	Vol. – %
O ₂	60 sec	Vol. – %
C _n H _m	60 sec	ppm
SO ₂	60 sec	g/m ³
NO	60 sec	ppm

Tabelle 3.2: 1992 vom iBMB eingesetzte Meßeinrichtungen

3.3.1 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung wurden Ni-CrNi-Thermoelemente in zwei verschiedenen Ausrüstungen eingesetzt. Mit glasseidenummantelten Thermoelementen vom Typ **K** wurden die Temperaturen im freien Tunnelquerschnitt, in und an den Fahrzeugen sowie in den Meßsteinen gemessen. Daneben wurden stahlummantelte Thermoelemente für die Messung der Temperaturen 10 cm vor den Meßsteinen verwendet. Zur Temperaturanalyse im Brandnahbereich wurden Strahlungs-pyrometer eingesetzt.

Die Grenzabweichung der glasseidenummantelten Thermoelemente Typ K der Klasse 2 beträgt gemäß DIN IEC 584, Teil 2, im Temperaturbereich von -40 °C bis 1200 °C ± 2.5 °C bzw. $\pm 0.0075 \cdot |T|$, wobei T in Grad Celsius angegeben wird.

Meßabweichungen, die auf die nasse Umgebung im Tunnel und die dort vorhandenen Brandrückstände zurückzuführen sind, können nicht quantifiziert werden.

3.3.2 Messung der Gasgeschwindigkeit

3.3.2.1 Bidirectional probe

Wegen der zu erwartenden hohen Temperaturen wurden zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit sogenannte „Bidirectional probes“ (BiDi), wie in Abb. 3.2 dargestellt, eingesetzt. Die durch die Strömung erzeugte Druckdifferenz Δp wird über einen induktiven Wegaufnehmer in einen Druckwert gewandelt und mittels der Beziehung

$$v = \frac{1}{k_p} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T \cdot \Delta p}{\varrho_0 \cdot T_0}} \quad (3.1)$$

in eine Geschwindigkeit umgerechnet. Es bedeuten:

- k_p Kalibrierungsfaktor für ein „Bidirectional probes“; hier $k_p = 1.08$
- T Gemessene Temperatur [K]
- Δp Mit dem „Bidirectional probes“ gemessene Druckdifferenz [Pa]
- ϱ_0 Dichte von Luft bei 0 °C = 1.275 kg/m⁻³
- T_0 Bezugstemperatur = 273.15 K

Werden die entsprechenden Zahlenwerte in die Gl.(3.1) eingesetzt, sowie zur Vermeidung von negativen Zahlenwerten unter der Wurzel und zur richtungsabhängigen Angabe des Geschwindigkeitswertes der Betrag und das Vorzeichen des gemessenen Druckes in die Gleichung mit aufgenommen, so ergibt für die Auswertung die Gleichung

$$v = 0.0702 \operatorname{sgn}(\Delta p) \sqrt{T \cdot |\Delta p|} \quad (3.2)$$

Die Temperatur T [K] in Gl.(3.2) wurde in unmittelbarer Nähe des „Bidirectional“ gemessen. Sie gibt den Einfluß der Temperatur auf die Dichte des strömenden Mediums wieder.

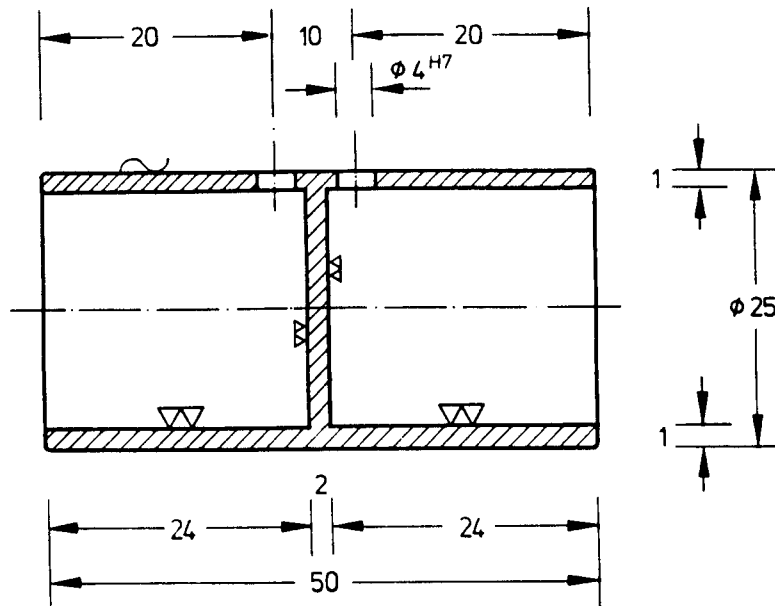


Abbildung 3.2: Bidirectional probe, Maße in mm

Eine weitergehende Beschreibung der Eigenschaften und Anwendung der „Bidirectional probes“ wird in NORDTEST METHOD [13], von EMMONS [15] oder MCCAFFREY, HESKESTAD [5] gegeben.

3.3.2.2 Flügelradanemometer

In den Versuchen wurde ein Flügelradanemometer im kälteren Bereich ($x = -100\text{ m}$) eingesetzt. Dieses Anemometer gibt ohne Umrechnung die momentane Geschwindigkeit an, wodurch die mittels Ventilator erzeugte Strömungsgeschwindigkeit überwacht werden konnte.

3.3.3 Rauchgasdichte

Die Rauchgasdichte wurde mit Geräten der Firma MAURER, Typ ME 82-log, geeignet zur Rauchdichtemessung nach DIN 50 055, ermittelt. Die Meßsignale werden als Lichttransmissionswerte (LT) analog angezeigt. Aus den Lichttransmissionswerten errechnet sich die optische Dichte (OD) bis max. OD = 3.00 nach folgender vom Hersteller angegebenen Definition:

$$\text{OD}(\lambda) = \log \frac{1}{\text{LT}(\lambda)} . \quad (3.3)$$

Dieser Wert steht ebenfalls an einem zweiten Meßausgang des Gerätes zur Verfügung. Die optische Dichte ist in der Darstellung gemäß Gl.(3.3) dimensionslos.

Die Lichttransmission und die optische Dichte sind abhängig von der Wellenlänge λ des Lichtes, das zur Messung eingesetzt wird. Als Lichtquelle für den Meßlichtgeber

wird eine Wolfram-Glühbirne, angeglichen der Verteilungstemperatur $T_V = 2856$ K (nach DIN 5033/ Teil 7) als Normlichtart A-Lichtquelle, herstellerseitig gewählt. Für den Vergleich der berechneten Daten mit den Meßwerten dient der Extinktionskoeffizient nach Gl.(2.32). Daher muß der gefundene Meßwert noch durch durchstrahlte Weglänge dx dividiert und mit $\ln 10$ multipliziert werden. Für die in Norwegen durchgeführten Brandversuche gilt $dx = 0.7$ m.

3.3.4 Gasanalyse

Zur Analyse der durch den Brand freigesetzten Gase wurden innerhalb des Meßbereiches 7 Querschnitte mit Meßpunkten zur Aufnahme der Kohlendioxid- und/oder -monoxidkonzentration (CO_2 und CO) versehen. Damit möglichst viele Meßpunkte abgefragt und analysiert werden konnten, wurde bei den Geräten der Tab. 3.3, Lfd. 3 und 4, je eine Umschaltanlage mit einem Schaltzyklus von 15 Sekunden eingesetzt, die über Dreiwegeventile dem Meßgerät die Gase von 6 verschiedenen Meßstellen zuführte. Die Analyse wurde durch eine BINOS-Anlage zur CO_2 -Analyse und durch das Nachfolgemodell BINOS 1001, welches die gleichzeitige Auswertung von CO_2 - und CO -Gehalt ermöglicht, vorgenommen.

Lfd.	Gasart	Analysegerät	Firma
1	CO	UNOR 6 N	Maihak
2	CO_2	UNOR 4 N	Maihak
3	CO, CO_2	BINOS 1001	Rosemount
4	CO_2	BINOS	Leybold-Heraeus
5	O_2	OXYGOR 6 N	Maihak
6	C_nH_m	FID-VE 5	J.U.M.
7	SO_2	UNOR 6 N	Maihak
8	NO	UNOR 6 N	Maihak

Tabelle 3.3: Überblick der Gasanalysegeräte

Bei den in Tab. 3.3 aufgeführten Geräten (außer Lfd. 5 und 6) wird eine photometrische Messung der selektiven Strahlungsabsorption in einer Gassäule zur Bestimmung der Gaskonzentration in den Verbrennungsgasen angewendet. Hierzu müssen die nachzuweisenden Gase infrarotaktiv sein. Die Gase absorbieren dann in einem gasspezifischen Wellenlängenbereich die Wärmestrahlung und ermöglichen einen Meßbereich von 100 Vol.-% bis in den Bereich von 10^{-4} Vol.-%.

Mit dem Gasanalysator Oxygor 6 N (Lfd. 5) kann der Sauerstoffgehalt in der Luft oder in anderen Gasen gemessen werden. Er nutzt die paramagnetischen Eigenschaften der Sauerstoffmoleküle. Auf Sauerstoffmoleküle in einem inhomogenen Magnetfeld wirkt eine Kraft in Richtung steigende Feldstärke, wobei die Kraft mit steigender Volumenkonzentration zunimmt. Diese Kraft wird zur Erzeugung des selektiven Meßeffektes benutzt.

Das Gerät mit der Lfd. 6 zur Ermittlung des Gesamtkohlenwasserstoffgehaltes C_nH_m basiert auf dem Prinzip des Flammenionisationsdetektors. Durch Anlegen eines elektri-

schen Feldes an eine Flamme, die mit reinem Wasserstoff unter Zuführung von kohlenwasserstofffreier Luft brennt, entsteht ein meßbarer Ionenstrom. Wird dieser Flamme ein kohlenwasserstoffhaltiges Gas zugeführt, so ändert sich der Ionenstrom proportional der Anzahl der Kohlenwasserstoffmoleküle, die pro Zeiteinheit der Flamme zugeführt werden.

3.3.5 Ausstattung des Tunnels

Meßquerschnitt x [m]	Querschnitts- Nummer	Tempe- ratur	Pyro- meter	Rauch- dichte	Luft- geschw.	Gas- anal.
- 200	01	20				
- 150	02	20				
- 100	03	16		1	1	2
- 65	04	13			3	
- 45	05	5				
- 30	06	20			3	2
- 20	08	60			5	2
- 10	09	20				
± 0	10	80			2	
+ 10	11	20				5
+ 20	12	66	4		5	2
+ 30	13	20			3	2
+ 45	15	6				
+ 65	16	12			3	
+ 100	19	30	2	1		2
+ 300	32			2		
+ 500	42			1		
+ 1000	64			1		

Tabelle 3.4: Meßstellen im Tunnel

Die Tab. 3.4 gibt eine Übersicht über die Verteilung der Meßeinrichtungen entlang der Längsachse des Tunnels. Dabei wurde auf eine verdichtete Meßstellenanordnung im Brandnahbereich besonderer Wert gelegt. Die Lage und Vermaßung der Meßstellen sind dem Anhang A beigelegt. Die Meßstellen sind nach ihrer Lage im Tunnel sowie der Art der physikalischen Größe, die dort aufgenommen wurde, benannt. Der Name der Meßstelle wird nach folgender Syntax gebildet:

Sektion Typ Höhe[cm] Position

Hierbei bedeuten:

Sektion Zwei Stellen zur Kennzeichnung des Querschnittes nach Tab. 3.4 .

Typ Diese beiden Buchstaben nach Tab. 3.5 geben Aufschluß über die eingesetzte Meßeinrichtung.

Höhe Die Höhe in Zentimeter über der Bodenoberfläche wird mittels dieser drei Stellen angegeben.

Position Hier wird durch einen Kleinbuchstaben angezeigt, ob sich die Meßeinrichtung rechts (r), links (l) oder in der Mitte des Tunnels (c) befindet.

Meßtyp	Bedeutung
AV	Luftgeschwindigkeit (berechnet)
CD	CO ₂ -Analysestelle
CN	C _n H _m -Analysestelle
CO	CO-Analysestelle
EC	Extinktionskoeffizient
LC	Wiegezeile
LT	Licht-Transmission
NO	NO-Analysestelle
OD	Optische Dichte (D)
OO	O ₂ -Analysestelle
OP	Opazität (F)
PA	Druck von Bidirectional d = 23 mm (D/F)
PB	Druck von Bidirectional d = 14 mm (N/S)
PP	Druck Pitot-Rohr (UK)
PD	Differenzdruck zwischen Boden und Tunneldecke (F)
PV	Druckdifferenz zwischen Fahrzeug- Innerem und Umgebung (A / I)
RP	Reflektorplatten (A)
SO	SO ₂ -Analysestelle
TA – TQ	Thermoelement im Meßstein
TS	Temperatur mit Pyrometer ermittelt
TT	Thermoelement im freien Tunnel
TU	OB Oberflächentemp. Tunnelgestein
TV	TO Oberflächentemp. Meßstein
TW	TR Temp. 10 cm vor Meßstein
TX	Fahrzeugelement Außenseite
TY	Fahrzeugelement Innenseite
VA	Geschw. Flügelrad-Anemometer

Tabelle 3.5: Abkürzungen der Meßtypbezeichner und deren Bedeutung

Ein Beispiel soll den Gebrauch dieser Namensgebung verdeutlichen:

03CD425r besagt, daß sich eine Meßstelle für die Kohlendioxidanalyse (CD) im Schnitt 3 (x = –100 m) auf 4.25 m Höhe auf der rechten Seite des Tunnels (r) befindet.

Handelt es sich bei den Meßpunkten mit einer Querschnittskennziffer 92 oder höher, so erfolgt mit den drei Ziffern der Höhenangabe eine fortlaufende Numerierung der Meßstelle, die dem gesonderten Plan des jeweiligen Objektes zu entnehmen ist.

4 Brandversuche

Aus den in Norwegen durchgeführten Versuchen werden für die Vergleichsrechnungen diejenigen Versuche ausgewählt, bei denen der zeitliche Verlauf des Abbrandes aufgezeichnet wurde. Mittels der Abbrandrate und dem Heizwert des Brennstoffes wird die Energiefreisetzung berechnet, die maßgeblich die Intensität des Brandes bestimmt.

Die Abbrandrate wurde während der Holzkrippen-Versuche Nr. 3 und 4 (Woodcrib-test No. 3 & 4), sowie dem Versuch mit der Mischbrandlast (Mixed fire load LF TIR) aufgezeichnet. Bei dem letztgenannten Versuch wurde die Ladung eines LKW simuliert; die Brandlast setzte sich aus Holz, Plastikfolie und Autoreifen zusammen, die bei geringer gerichteter Zuluftströmung (**Low Flow**) verbrannt wurde. Die beiden Versuche mit Holzkrippen unterschieden sich in der Stärke der Zuluftströmung, nicht aber in der Zusammensetzung und Menge der Brandlast.

Die ausgewählten Versuche ermöglichen es, den Einfluß der Zuluftströmung auf die Ausbreitung der Heißgase bei drei verschiedenen Zuluft-Volumenströmen zu studieren (s. Tab. 4.1).

Versuch	Brandlast [kg]	Heizwert [GJ]	Volumenstrom [m ³ /s]
Holzkrippen Nr. 3	961	14.6	15
Holzkrippen Nr. 4	1000	15.2	90
Mischbrandlast	2854	58.0	25

Tabelle 4.1: Ausgewählte Schwerpunkte für die Vergleichsrechnung

Der in Tab. 4.1 eingetragene Volumenstrom wurde aus den Messungen der Luftgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$ min abgeschätzt. Während des Versuches Holzkrippen Nr. 3 war der Ventilator, der für eine stabile Luftströmung sorgen sollte, nicht in Betrieb.

4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Im folgenden wird mit „vor“ die portalseitige und mit „hinter“ die schachtseitige Position zur Brandlast bezeichnet.

4.1.1 Holzkrippenversuch Nr. 3

Der Ventilator am Portal ist nicht eingeschaltet; die Gebläseöffnung in der Druckwand ist durch zwei große Holzplatten annähernd vollständig verschlossen.

Die Holzkrippen-Brandlast ist auf der Wiegebühne auf eine Fläche von $0.80 \times 3.20 \text{ m}^2$ aufgebaut. Auf dieser Fläche sind die Holzkrippen in 5 Stapeln von jeweils $0.80 \times 0.80 \text{ m}^2$ Grundfläche mit einer Stapelhöhe von 15 Holzkrippen verteilt. Dabei sind die Stapel folgendermaßen angeordnet: die untere Lage besteht aus 3 Holzkrippen,

die jeweils an den Ecken auf 50 cm hohen Gasbeton-Blocksteinen liegen; der Abstand der Holzkrippen beträgt 0.40 m. Auf der unteren Lage liegen 2 Holzkrippen jeweils mittig über den beiden Lücken. Als nächste Lage sind wieder 3 Holzkrippen wie in der unteren Lage angeordnet, wobei die äußeren beiden Holzkrippen durch 3 Einzelstäbe gegen Kippen gesichert sind.

Als Zündquelle wird ca. 1.2 kg Isopropanol verwendet, der in fünf kleine Stahlgefäße gefüllt ist, die unter den fünf Holzkrippenstapeln stehen.

4.1.1.1 Holzkrippenversuch Nr. 3: Versuchsbeobachtungen

- 0. Min.: Zündung des Isopropanols unter dem schachtseitigen Holzkrippenstapel, nach 10 Sekunden sind alle fünf Stahlgefäße erfolgreich gezündet. Nach 20 Sekunden ist das Knistern von der Verbrennung zu hören. Nach ca. 30 Sekunden ist die dritte Holzkrippenlage von den Flammen erreicht. Die Holzkrippenstapel brennen gleichmäßig ab.
- 2. Min.: Oben aus den Holzkrippen kommt dunkelgrauer Rauch, der senkrecht aufsteigt und sich gleichmäßig unter der Decke verteilt. An den Seiten der Holzkrippenstapel steigen dunkle Rauchwolken empor.
- 3. Min.: Die Rauchsicht an der Decke erreicht Querschnitt -10 m. Immer noch steigt der Rauch direkt über der Brandlast senkrecht nach oben.
- 4. Min.: Die Rauchspitze unter der Decke erreicht Querschnitt -25 m. Der Rauch verteilt sich gleichmäßig in Richtung Schacht und in Richtung Portal. Die Flammen erreichen die obere Lage der Holzkrippenstapel. Der Rauch unter der Decke ist hellgrau mit wattigem Aussehen. Über den Holzkrippenstapeln steigt dunkelbrauner bis schwarzer Rauch auf.
- 5. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt -45 m. Der Rauch bewegt sich mit ca. 0.25 m/s in Richtung Portal.
- 11. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt -135 m. Der Rauch an der Decke hat ungefähr eine Dicke von 2.0 - 2.5 m, die Rauchsicht fällt an der Spitze auf ca. 1 m Dicke ab. Die Brandlast ist weiterhin zu erkennen.
- 13. Min.: Die Rauchspitze erreicht Querschnitt -170 m. Die Rauchdicke beträgt unter der Decke ca. 1 m. Die Rauchspitze bewegt sich mit herabfallendem Rauch auf Querschnitt -180 m zu. Nach etwa 25 Sekunden hat sie den Querschnitt -180 m erreicht, d. h., der Rauch bewegt sich mit ca. 0.4 m/s in Richtung Portal. Von Querschnitt -180 m ist die Brandlast nicht mehr zu sehen. Der Rauch ist dort bis auf den Boden heruntergefallen, man hört aber weiterhin das verbrennende Holz.
- 15. Min.: Der Rauch erreicht an der Decke Querschnitt -200 m. Die Rauchwalze ist an der Spitze zerfranst und fällt unmittelbar an der Spitze herunter bis auf den Boden. Beim Erreichen von Querschnitt -210 m nach ca. 35 Sekunden, d. h., die Rauchbewegung beträgt ca. 0.3 m/s, ist die Rauchsicht an der Decke nicht mehr deutlich als Walze zu erkennen, sondern sie ist zerfasert und fällt an der Spitze sofort herunter.

18. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt -220 m. Im Querschnitt -220 m kann man mit Hilfe der Taschenlampe noch die Reflektionstafeln auf der rechten Seite im Querschnitt -180 m, -190 m, -210 m erkennen; beim Querschnitt -180 m ist nur die Tafel im Bereich zwischen 1.50 - 2.00 m über dem Boden zu erkennen. Die Rauchfront hat sehr viel Mühe, den Querschnitt bei -230 m zu erreichen; sie bildet im Tunnel kurz vor Querschnitt -230 m unter der Decke eine ca. 2 - 3 m dicke Schicht und auf dem Fußboden eine rd. 0.5 m hohe Schicht. Der Bereich zwischen Decken- und Bodenschichtung ist annähernd rauchfrei, nur an der Wand sind sehr dünne, wenig ausgeprägte Rauchwolken zu erkennen.
21. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt -235 m.
23. Min.: Auf dem Fußboden erreicht die Rauchspitze Querschnitt -240 m, rd. 15 Sekunden später passiert die Rauchspitze an der Decke diesen Querschnitt.
25. Min.: Die Tunnelerweiterung im Querschnitt -248 m füllt sich mit Rauch. Ausgeprägt sind die Rauchbewegungen an der Decke und am Fußboden, während die Reflektionstafeln in 1.50 - 2.00 m Höhe weiterhin zu sehen sind.

4.1.1.2 Holzkrippenversuch Nr. 3: Beobachtungen mit der stationären Kamera

Die im folgenden beschriebenen Beobachtungen wurden mit einer stationären Videokamera, die im Querschnitt +80 m positioniert war, aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Kamera ist es möglich, die Ereignisse hinter der Brandlast zu beobachten¹.

0. Min.: Zündung der Brandlast; 40 Sekunden später ist der erste Rauch unter der Decke erkennbar.
1. Min.: Aus der Brandlast herausschlagende Flammen, sowie aufsteigender Rauch sind zu beobachten.
2. Min.: Die Rauchgase könnten den Querschnitt +10 m erreicht haben; die Rauchgasgrenzschicht befindet sich ca. 4 m über dem Boden.
3. Min.: Die Rauchgase haben den Querschnitt +20 m erreicht, wobei sich die Rauchgasgrenzschicht ca. 3 m über dem Boden befindet. Ungefähr 40 Sekunden später haben die Rauchgase den Querschnitt +40 m erreicht.
4. Min.: Die Rauchgase haben den Querschnitt +50 m erreicht. Insgesamt befindet sich die Rauchgasgrenzschicht ca. 3 m über dem Boden. 16 Sekunden später haben die Rauchgase den Querschnitt +60 m erreicht, weitere 30 Sekunden später den Querschnitt +65 m.
5. Min.: Die Rauchgasgrenzschicht befindet sich in den Querschnitten +60 und +50 ca. 2.5 m über dem Boden. In den Querschnitten +40, +30 und +20 liegt die Rauchgasgrenzschicht rd. 3 m über dem Boden.

¹Zum Holzkrippenversuch Nr. 3 war die Uhr vor der stationären Videokamera nicht installiert. Deswegen wurden die Zeitangaben vom Zählwerk des Videorekorders abgelesen.

6. Min.: Die Rauchgase haben begonnen zum Brandherd zurückzuströmen. Die Luftschicht, die inzwischen im Querschnitt +60 m in 2 m Höhe endet, ist noch relativ rauchfrei. Die Rauchgasgrenzschicht beschreibt im Querschnitt +60 m einen kleinen Bogen. Sie liegt am Rand etwas tiefer als in der Mitte des Querschnittes.
7. Min.: Die Rauchgasgrenzschicht hat sich in der Mitte des Querschnittes +60 m etwas abgesenkt, so daß diese keinen Bogen mehr beschreibt. Ca. 40 Sekunden später ist keine klare Rauchgasgrenzschicht mehr zu erkennen. Auch die bisher relativ rauchfreie Zone in der Querschnittsmitte beginnt zu verrauchen.
8. Min.: Nur noch ein Bereich von ca. 0.5 m über dem Boden ist noch relativ rauchfrei. Die Befestigungsstange der Bidirectional probe (BiDi) im Querschnitt +65 m ist über eine Höhe von ca. 2 m noch gut zu erkennen. Die Flammen vom Brandherd sind noch gut zu erkennen. Die Rückströmung der Rauchgase zum Brandherd ist deutlich sichtbar.
9. Min.: Die untere Reflektionsplatte im Querschnitt +60 m ist noch schemenhaft zu erkennen. Ein Bereich von ca. 3 m im Durchmesser um die Befestigungsstange der BiDi im Querschnitt +65 m ist noch relativ rauchfrei. Die Flammen vom Brandherd sind noch erkennbar.
10. Min.: Zwischenzeitlich war die Reflektionsplatte im Querschnitt +60 m wieder lesbar. Der Bereich um die Befestigungsstange der BiDi im Querschnitt +65 m ist immer noch relativ rauchfrei.
11. Min.: Der mit der stationären Videokamera beobachtbare Bereich ist bis auf eine 0.3 bis 0.5 m dicke Bodenschicht verqualmt. Die Bodenschicht gilt allerdings nicht als vollständig rauchfrei. Im Querschnitt +60 m sind die Reflektionsplatten nicht mehr sichtbar.
12. Min.: Der Bereich zwischen Videokamera und Brandlast ist vollständig verqualmt; auch die Befestigungsstange der BiDi im Querschnitt +65 m ist nicht mehr zu sehen.

4.1.2 Holzkrippenversuch Nr. 4

Der Ventilator am Portal läuft auf niedriger Stufe, 2 Klappen im Druckrohr sind geöffnet. Der Luftdruck beträgt vor der Druckwand, d. h., außerhalb des Tunnels 977.8 mbar und unmittelbar hinter der Druckwand im Tunnel 979.5 mbar. Die Luftgeschwindigkeit in ca. 2 m Höhe wird im Querschnitt -135 m mit 6 m/s, im Querschnitt -10 m mit 4.8 m/s und links neben der Brandlast mit 6,5 m/s gemessen. Die Temperatur beträgt im Querschnitt -135 m ca. 8.2 °C.

Die Holzkrippen-Brandlast ist auf der Wiegebühne auf eine Fläche von 0.80 * 3.20 m² aufgebaut. Auf dieser Fläche sind die Holzkrippen in 5 Stapeln von jeweils 0.80 * 0.80 m² Grundfläche mit einer Stapelhöhe von 15 Holzkrippen verteilt. Dabei sind die Stapel folgendermaßen angeordnet: die untere Lage besteht aus 3 Holzkrippen, die jeweils an den Ecken auf 50 cm hohen Gasbeton-Blocksteinen liegen; der Abstand der Holzkrippen beträgt 0.40 m. Auf der unteren Lage liegen 2 Holzkrippen jeweils

mittig über den beiden Lücken. Als nächste Lage sind wieder 3 Holzkrippen wie in der unteren Lage angeordnet, wobei die äußeren beiden Holzkrippen durch 3 Einzelstäbe gegen Kippen gesichert sind.

Als Zündquelle wird ca. 1.2 kg Isopropanol verwendet, der in fünf kleine Stahlgefäße gefüllt ist, die unter den fünf Holzkrippenstapeln stehen.

4.1.2.1 Holzkrippenversuch Nr. 4: Versuchsbeobachtungen

0. Min.: Zündung des Isopropanols unter dem schachtseitigen Holzkrippenstapel. Innerhalb von 5 - 10 Sekunden sind alle fünf Stahlgefäße gezündet. Bei den zum Portal gelegenen Stahlgefäßen flackern die Flammen, und man sieht deutlich, daß die Flammenspitzen Schwierigkeiten haben, die unteren Holzkrippen zu erreichen. Im Bereich der Stahlgefäße, die zum Schacht hin angeordnet sind, sind die Flammen bereits in der 2. bzw. in der 3. Lage. Im portalseitigen Holzkrippenstapel ist bisher kein Durchbrand erfolgt.
2. Min.: Starke Rauchbildung infolge Durchbrand der hinteren Krippen, der Rauch zieht annähernd waagrecht von den Holzkrippen in Richtung Schacht.
3. Min.: Die vorderen Holzkrippenstapel brennen noch nicht. In den mittleren Holzkrippenstapeln ist die 7. bis 8. Krippe von unten durchgebrannt. Im hinteren Holzkrippenstapel schlagen oben Flammen heraus; die Flammen werden über den Holzkrippen sofort in Richtung Schacht umgelenkt. Im mittleren Holzkrippenstapel schlagen die Flammen jetzt seitlich aus den Holzkrippen heraus.
5. Min.: Die vorderen Holzkrippenstapel, d.h. die portalseitig angeordneten Holzkrippenstapel, brennen nicht.
6. Min.: Im mittleren Holzkrippenstapel erreichen die seitlich herausschlagenden Flammen die oberen Holzkrippen. Auf der linken Tunnelseite brennen die hinteren drei Stapel; die Flammen reichen ca. 1.0 - 1.5 m über die obere Holzkrippenlage. Die vorderen Holzkrippenstapel brennen nicht. Das Isopropanol unter dem vorderen Holzkrippenstapel ist ausgebrannt.
8. Min.: Die Beobachtungen können direkt vor der Brandlast durchgeführt werden, da die Flammen eindeutig in Richtung Schacht abgelenkt werden und die beiden vorderen Stapel nicht brennen.
9. Min.: Die Flammen über der oberen Holzkrippenlage haben eine Länge von ca. 2 - 3 m und werden linksseitig (10 - 11 Uhr) in Richtung Schacht abgelenkt.
10. Min.: Einzelne Flammen erreichen die Tunneldecke im Abstand von ca. 5 - 6 m hinter der Brandlast (Richtung Schacht). Dabei ist zu beobachten, daß die Flammen leicht in Richtung der linken Tunnelwand abgelenkt werden.

10. Min.: In den unteren Lagen sind die Holzkrippen vom zweiten Stapel von vorn entzündet. Der vordere Holzkrippenstapel ist weiterhin nicht entzündet.
12. Min.: Von Querschnitt -10 m sind die Scheinwerfer hinter der Brandlast, d.h. im Querschnitt +20 m bis +60 m, deutlich zu erkennen. Die Flammenspitzen erreichen die Tunneldecke und das obere Wanddrittel auf der linken Seite des Tunnels. Auf der rechten Seite des Tunnels wird die Wand nicht von den Flammen berührt und die Decke nur von einzelnen Flammenspitzen.
13. Min.: Der zweite Holzkrippenstapel von vorn brennt jetzt auf ganzer Höhe.
14. Min.: Es scheint eine Zentrierung der Flammenspitze in die Achse der Brandlast stattzufinden. Nur noch vereinzelt Flammen erreichen auf der linken Seite auch die Wand. Der überwiegende Teil der Flammen ist jetzt gegen die Decke ungefähr im Bereich zwischen 2 - 5 m hinter der Brandlast gerichtet. Die Flammen sind goldgelb und hell leuchtend, es ist keine deutliche Rauchbildung zu erkennen.
17. Min.: Der vordere Holzkrippenstapel ist weiterhin nicht entzündet. Die Flammen haben sich in der Vertikalen zentriert und beaufschlagen hauptsächlich die Decke im Bereich von 3 - 5 m hinter der Brandlast.
18. Min.: Die Holzkrippen sind auf die rechte Seite gekippt und liegen um die im Querschnitt ± 0 m angeordnete Stütze. Die Flammen haben in dem umgekippten Stapel eine Höhe von 2 - 3 m. Deutliche Abplatzgeräusche sind zu hören; sie rühren von Betonsplittern her, die vom Fußboden bis an die Decke geschleudert werden.
35. Min.: Es sind nur noch Flammen im hinteren Bereich, d.h. im Bereich zum Schacht, zu erkennen. Im wesentlichen besteht die Brandlast jetzt nur noch aus glühender Holzkohle.
48. Min.: Ende der Beobachtungen.

4.1.2.2 Holzkrippenversuch Nr. 4: Beobachtungen mit der stationären Kamera

Die im folgenden beschriebenen Beobachtungen wurden mit einer stationären Videokamera, die im Querschnitt +80 m positioniert war, aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Kamera ist es möglich, die Ereignisse hinter der Brandlast zu beobachten.

0. Min.: Zündung der Brandlast
2. Min.: Aus der Brandlast herausschlagende Flammen, sowie aufsteigender Rauch sind zu beobachten.
3. Min.: Der Bereich zwischen der Kamera und der Brandlast ist leicht verraucht. 30 Sekunden später hat der Grad der Verqualmung seinen bisherigen Höchststand erreicht und wird die nächste Zeit beibehalten. Die Zone unter der Decke ist stärker verqualmt als der Bereich direkt über dem Boden.

- 5. Min.: Die Sichtverhältnisse haben sich weiterhin nicht geändert.
- 7. Min.: Der Rauch beginnt sich etwas zu lichten; im Querschnitt 65 m ist die Decke des Tunnels wieder zu erkennen.
- 8. Min.: Die Sichtweite verbessert sich stetig.
- 9. Min.: Der gesamte Bereich bis zur Brandlast ist klar erkennbar. Auch die Bereiche an der Decke sind deutlich zu erkennen. Im Scheinwerferlicht vor der Kamera sind die Turbulenzen der Strömung durch Funken- und/oder Aschenflug erkennbar
- 12. Min.: Langsam ist wieder ein ansteigender Rauchgehalt in der Strömung zu erkennen.
- 15. Min.: Keine starke Veränderung des Rauchgehaltes in der Strömung im Tunnel.
- 17. Min.: Es ist eine Veränderung der Flammenschatten zu erkennen: Die Flammen sind jetzt weiter unten über dem Boden verteilt. Ca. 30 Sekunden später besteht eine sehr starke Verrauchung im Bereich zwischen stationärer Videokamera und Brandlast. Das untere Schild der im Querschnitt +60 m ist nicht mehr zu erkennen.
- 23. Min.: Es findet bereits eine stetige Verbesserung der Sichtverhältnisse statt.
- 25. Min.: Die Sicht im Bodenbereich hat sich soweit gebessert, daß die Flammen, die aus der Brandlast schlagen, zu erkennen sind
- 60. Min.: Der Bereich zwischen Brandlast und Kamera ist fast frei von Rauch; im Bereich der Brandlast sind noch kleine Flammen zu erkennen.

4.1.3 Mischbrandlast (LF TIR)

Die Brandlast ist auf der Wiegebühne aufgebaut; sie besteht aus Holzkrippen, Plastiksäcken und Autoreifen. Die Holzkrippen sind auf einer Grundfläche von $2,40 \times 2,40 \text{ m}^2$ angeordnet, d.h., eine Lage besteht aus $3 \times 3 = 9$ Holzkrippen. Die erste (untere) Holzkrippenlage liegt auf Gasbeton-Blocksteinen. Nach ca. 5 Lagen Holzkrippen kommt eine Schicht Plastiksäcke, dann 3 Lagen Holzkrippen, 1 Lage Plastiksäcke und 4 Lagen Holzkrippen. Auf der oberen Holzkrippenlage sind die restlichen Plastiksäcke und darauf die Autoreifen gestapelt.

Als Zündquelle wird ca. 3 l Spiritus verwendet. Er ist in 5 flache Stahlgefäße gefüllt, die zentrisch unter der Brandlast und auf jeder Seite unter der mittleren Holzkrippe stehen.

4.1.3.1 Mischbrandlast (LF TIR): Versuchsbeobachtungen

- 0. Min.: Nach 30 Sekunden schlagen Flammen oben aus der Brandlast.
- 4. Min.: Die schachtseitige Hälfte der Brandlast brennt. Der Rauch zieht an der Decke entlang und erreicht Querschnitt - 50 m.
- 5. Min.: Die Rauchsicht unter der Decke hat eine Dicke von ca. 50 cm und ist eben geschichtet.

- 6. Min.: Im Querschnitt - 65 m bewegt sich die Rauchschrift mit einer Geschwindigkeit von 0.18 m/s in Richtung Portal.
- 7. Min.: Die Spitze der Rauchschrift erreicht Querschnitt - 75 m. Die Brandlast brennt relativ gleichmäßig ab. Die Flammen schlagen oben aus der Brandlast; die Flammenachse ist leicht zur linken Seite geneigt. Auf der rechten Seite der Brandlast sind nur vereinzelte kleine Flammenzungen zu erkennen.
- 9. Min.: Die Rauchschrift ist hauptsächlich an der Decke vorhanden; sie hat im Bereich der Brandlast eine Dicke von ca. 50 cm, die sich bis zur Rauchspitze im Querschnitt - 75 m auf wenige Zentimeter verringert.
- 10. Min.: Von Querschnitt - 85 m ist zu erkennen, daß vor allen Dingen die linke Seite der Brandlast brennt, der Rauch wird deutlich dunkler.
- 11. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt - 85 m. Er bewegt sich mit ca. 0.13 m/s in Richtung Portal. Es ist eine deutliche Walzenbewegung in der Rauchspitze zu erkennen. Der Rauch hat an der Spitze eine Dicke von ca. 1 m. Der Rauch ist dunkel bis schwarz.
- 12. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt - 100 m, die Brandlast ist noch zu erkennen. Die Rauchschrift ist nur im Deckenbereich, die Wände sind rauchfrei.
- 14. Min.: Der Rauch erreicht Querschnitt - 110 m. Der Rauch ist schwarz und hat in der Spitze eine Dicke von ca. 1.00 m bis 1.50 m. Er bewegt sich walzenförmig und hat nach ca. 10 m, d.h. im Querschnitt - 100 m eine Dicke von über 2 m.
- 15. Min.: Von Querschnitt -125 m ist die Brandlast nicht mehr zu erkennen.
- 21. Min.: Der Rauch scheint im Querschnitt - 115 m zu stehen, er bewegt sich nicht mehr voran.

4.1.3.2 Mischbrandlast (LF TIR): Beobachtungen mit der stationären Kamera

Die im folgenden beschriebenen Beobachtungen wurden mit einer stationären Videokamera, die im Querschnitt +80 m positioniert war, aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Kamera ist es möglich, die Ereignisse hinter der Brandlast zu beobachten. Es ist hier zu beachten, daß für die Aufnahmen mit der stationären Videokamera eine ausreichende Ausleuchtung vorzusehen war.

- 0. Min.: Zündung der Brandlast
- 1. Min.: Der Rauch kommt im Querschnitt +50 m an.
- 2. Min.: Der Rauch hat den Querschnitt +50 m erreicht und sinkt schnell auf die Höhe 2 m über dem Boden ab.
- 3. Min.: Das Feuer ist vom Querschnitt +80 m noch gut zu erkennen. Eine Rauchgasgrenzschicht liegt im Bereich zwischen der Kamera und der Brandlast nicht vor.

4. Min.: Der Rauch hat sich im Bereich zwischen Kamera und Brandlast bis auf ca. 1 m über dem Boden abgesenkt. Die brennende Brandlast ist noch zu erkennen.
5. Min.: Die unteren Reflektorplatten in den Querschnitten +40 und +50 m sind noch zu erkennen.
6. Min.: Der Rauch setzt sich im Bereich zwischen der Kamera und der Brandlast immer weiter nieder. Es herrscht durch den Rauch ein diffuses Licht. Die von der Brandlast ausgehenden Flammen sind noch zu erkennen.
7. Min.: Im betrachteten Bereich zwischen der Kamera und der Brandlast ist der Bodenbereich bis zu einer Höhe von 0.5 bis 1.0 m relativ rauchfrei.
8. Min.: Die Unterkanten der unteren Reflektorplatten in den Querschnitten +40 und +50 m sind weiterhin zu erkennen.
9. Min.: Der Schriftzug auf der Reflektorplatte im Querschnitt +60 m ist noch lesbar. Die Flammen der Brandlast sind nicht mehr zu erkennen.
10. Min.: Eine Rauchgas-Rückströmung ist zu erkennen; die untere Reflektorplatte im Querschnitt +60 m ist jetzt nicht mehr zu erkennen.
11. Min.: Der Bereich zwischen der Kamera und der Brandlast ist vollständig ver-raucht.

4.2 Meßergebnisse

Die in Abschnitt 3.3 beschriebene Art der Auswertung der Rauch- und Heißgasbewegung wird mit zunehmender Entfernung zum Brandherd schwieriger, weil sich die Heißgase mit wachsender Entfernung zum Brandherd abkühlen und die Temperaturdifferenz zur Umgebung kleiner wird. Die Kopplung von Rauch- und Heißgasbewegung wird schwächer, so daß der Weg der Rauchgase nicht mehr eindeutig über eine Temperaturerhöhung erfaßt werden kann.

Dennoch stellt die Art der Erfassung der Rauchgasbewegung über eine Temperaturänderung eine gebräuchliche Methode dar. Diese Methode ermöglicht es auf einfache Weise, ein dichtes Netz mit zahlreichen Meßstellen aufzubauen. Weiterhin liefern die Thermoelemente natürlich die absoluten Temperaturwerte, die bei einem Einsatz von beispielsweise Rauchdetektoren zur Erfassung der Rauch- und Heißgasbewegung, nicht als Ergebnis geliefert werden würden.

Eine Aussage über die Menge des entstandenen Rauches ist mittels Thermoelementen nicht möglich. Hierzu müssen Meßgeräte zur Messung der Lichttransmission eingesetzt werden, die nicht in dem Umfang beschafft werden können, wie Thermoelemente.

Um die Art der Meßwertanalyse aus den gemessenen Temperaturen für die Rauch- und Heißgasbewegung zu überprüfen, sollen anhand eines Beispiels (Holzkrippenversuch Nr. 3) die von den Thermoelementen registrierten Temperaturen ausgewertet werden. Der Anstieg der Temperatur gegenüber der Anfangstemperatur wird als Anzeichen dafür gesehen, daß die Heißgase an dem betreffenden Thermoelement angekommen sind.

Als Beispiel für diese Art der Beurteilung der Heißgasbewegung wird in Abb. 4.1 die Versuchsbeobachtung aus Abschnitt 4.1.1 illustriert.

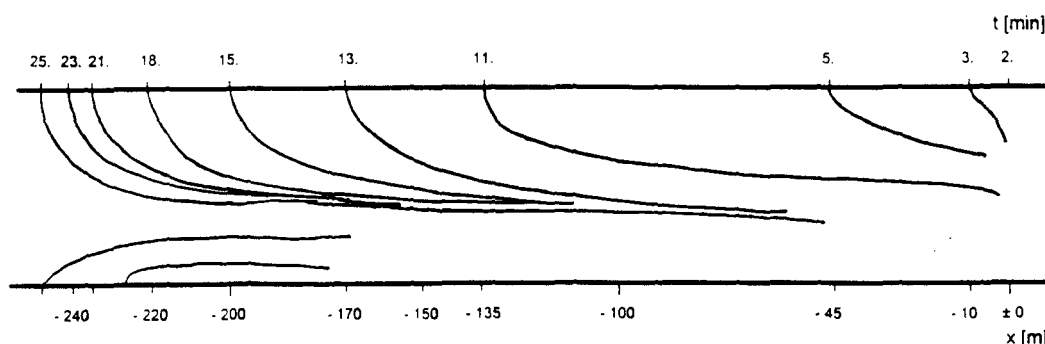


Abbildung 4.1: Holzkrippenversuch Nr. 3: Heißgasbewegung im Bereich vor der Brandlast; Auswertung anhand der Versuchsbeobachtungen

Die Tab. 4.2 gibt die Zeitpunkte an, an denen mit den Thermoelementen unter der Tunnelfirste eine Erwärmung gemessen wurde.

x [m]	-200	-150	-100	-65	-45	-30	-20	-10
Zeitpunkt [min]	15	12	9	7	5	4	4	3

Tabelle 4.2: Holzkrippenversuch Nr. 3: Zeitpunkt, zu dem der Rauch im Querschnitt x ankommt

Werden die gemessenen Daten aus Tab. 4.2 mit der Darstellung aus Abb. 4.1 verglichen, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Daher kann die Heißgasbewegung in erster Näherung mit Hilfe der Temperaturerhöhung in den Querschnitten rekonstruiert werden.

Mit den Geräten zur Rauchdichtemessung ist es möglich, Angaben über den Grad der Sichtbehinderung durch die sich ausbreitenden Heißgase zu erhalten.

Eine hinter der Brandlast befindliche stationäre Videokamera liefert einen visuellen Eindruck über die dort bestehenden Sichtverhältnisse.

4.2.1 Holzkrippenbrandversuche

4.2.1.1 Holzkrippenversuch Nr. 3

Als Beobachtungszeitraum wurden die ersten zehn Minuten nach der Zündung ausgewertet, die in diesem Versuch als Brandentstehungsphase bezeichnet werden kann. Die Abbildung 4.2 zeigt die gemessene Abbrandrate.

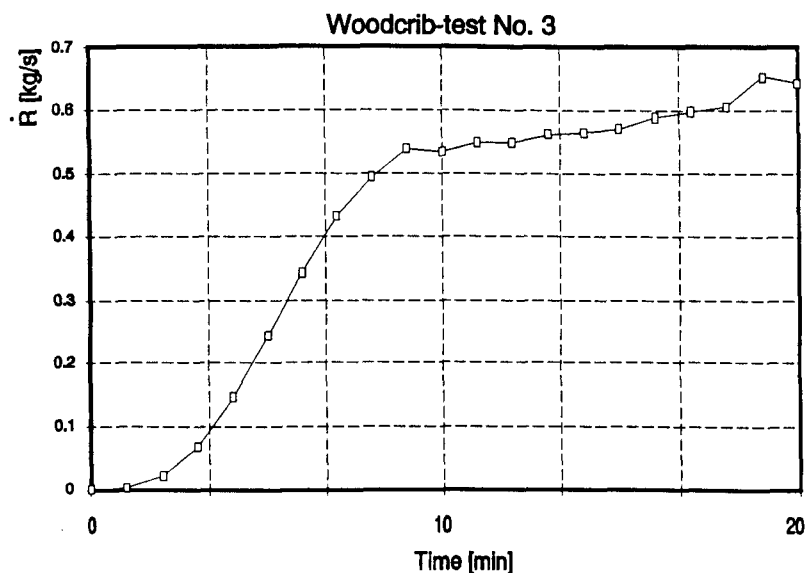


Abbildung 4.2: Holzkrippenversuch Nr. 3: Gemessene Abbrandrate \dot{R} (Mass loss)

Aus Abb. 4.2 ist zu erkennen, daß bei $t = 10$ min der exponentielle Anstieg der Abbrandrate beendet ist. Es schließt sich die ventilationsgesteuerte stationäre Brandphase an (vergl. Abb. 2.2), während der es wegen Sauerstoffmangel verstärkt zur Bildung von Kohlenmonoxid kommen kann.

Die Abbrandrate konnte nur bis $t = 20$ min gemessen werden, da die Datenerfassung der Wiegezellen zu diesem Zeitpunkt ausfiel.

Die Analyse der Rauchausbreitung wurde auf den Zeitraum der Brandentstehungsphase beschränkt. Verglichen mit den Schilderungen aus der fünften Minute ist eine Übereinstimmung mit den Meßdaten erkennbar. Als Beispiel dient hier der Temperaturverlauf des Thermoelementes von Querschnitt –45 m, welches sich in 4.9 m Höhe in der Tunnelachse befindet, dessen Meßwerte in Abb. 4.3 dargestellt sind.

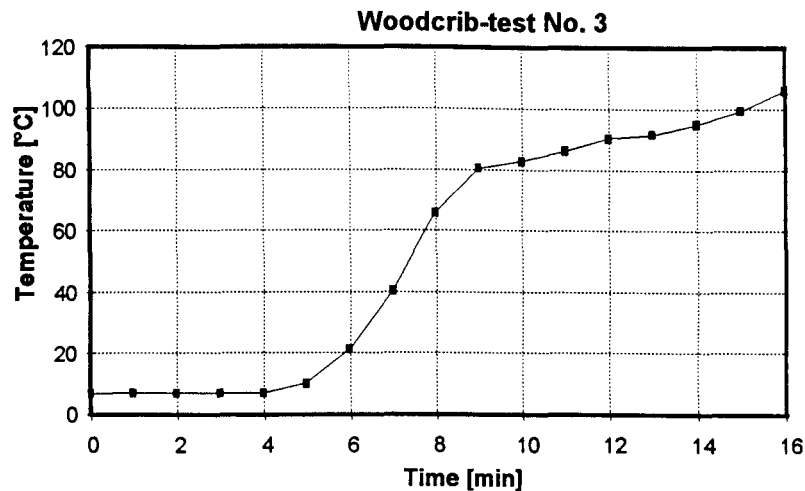


Abbildung 4.3: Gemessene Temperatur im Querschnitt - 45 m in 4.90 m Höhe, Holzkrippenversuch Nr. 3

Wie in der Versuchsbeobachtung geschildert, kommen die Heißgase in der fünften Minute nach der Zündung im Querschnitt -45 m an. Die gemessene Temperatur steigt ebenfalls in der fünften Minute leicht an. Die ersten Rauchscheiden sind noch stark mit der Kaltgasschicht vermischt und verursachen nur einen geringen, aber merklichen Temperaturanstieg im Bereich der Tunnelfirste.

Die Analyse der Rauchbewegung aus der Videoaufzeichnung und der Versuchsbeobachtung ergibt in den ersten fünf Minuten eine Verteilung des Rauches in Richtung Portal und Schacht, wobei sich in Richtung Schacht eine stärkere Verqualmung einstellt. Ab der sechsten Minute beginnt sich eine wellenförmige Verteilung der Heißgasschicht in Tunnellängsrichtung einzustellen. Die Höhenlage der Heißgasgrenzschicht, d.h. der Grenzschicht zwischen Heißgasschicht an der Tunneldecke und Kaltgasschicht am Tunnelboden, variiert zwischen 4 m im Querschnitt -30 m und 1 m im Querschnitt -45 m. Es bilden sich nach der Temperaturanalyse gering verrauchte Bereiche in einer stark verrauchten Umgebung. Diese gering verrauchten Bereiche liegen sowohl auf der Portalseite als auch auf der Schachtseite in einer Entfernung zwischen 10 und 45 m von der Brandstelle (vergl. Abb. 4.4). Mit fortschreitender Versuchsdauer werden auch diese Bereiche von Rauch durchsetzt.

Aus der Versuchsbeobachtung mit der stationären Videokamera geht hervor, daß der Bereich um die BiDi-Befestigungsstange im Querschnitt +65 m zur 8. Minute relativ rauchfrei ist. Dieses Ergebnis deckt sich annähernd mit dem in Abb. 4.4 dargestellten Verlauf im Querschnitt +65 m.

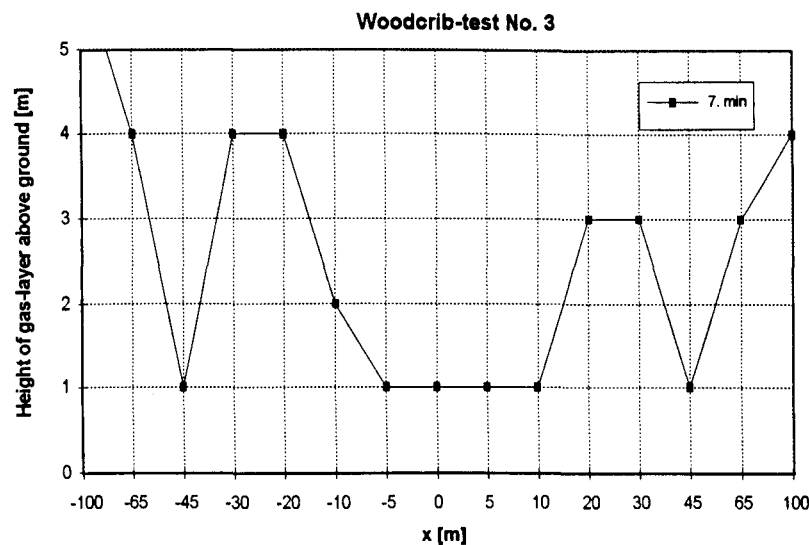


Abbildung 4.4: Holzkrippenversuch Nr. 3, Höhe der Heißgas-schicht über dem Tunnelboden nach 7 Minuten Branddauer

Eine mögliche Ursache für die Ausbildung dieser gering verrauchten Bereiche ist durch die unstetige Tunnelkontur gegeben. Der Tunnel ist nicht ausgebaut bzw. verkleidet und besitzt dadurch bereichsweise eine stark zerklüftete Wand- und Deckenoberfläche. An Vorsprüngen werden die Heißgase aus der Längsströmung in Richtung Tunnelboden abgelenkt und bilden dort eine stark verrauchte Zone. Dieser Effekt wird auch durch Deckenverkleidungen aus Wellblech erzeugt.

So auch in den Abschnitten - 35 bis - 45 m und + 50 bis + 105 m. In letzterem Abschnitt bildet das Wellblech mit der Tunneldecke keinen bündigen Abschluß, sondern ist von der Decke abgehängt.

Weiterhin bewirkt eine Veränderung der Strömungsquerschnitte entlang des Strömungsweges auch eine Änderung der Schichtdicke der Heißgase.

4.2.1.2 Holzkrippenversuch Nr. 4

Eine Heißgasverteilung wie beim Holzkrippenversuch Nr. 3 ist hier wegen der vorhandenen Zwangsbelüftung nicht eingetreten. Der Bereich vom Portal bis zur Brandlast war hier rauchfrei, während der Bereich von Querschnitt +10 m bis Querschnitt +80 m hinter der Brandlast schon nach ca. 3.5 Minuten vollständig verqualmt war.

In der 9. Minute nach der Zündung haben sich die Sichtverhältnisse so weit gebessert, daß der Bereich um die Brandlast wieder zu erkennen ist. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt des Brandgutes und der geringen Sichtweite während der ersten Minuten.

4.2.2 Rauchentwicklung bei den Holzkrippenbrandversuchen

Durch Vergleich der beiden Versuche mit Holzkrippen (Nr. 3 und Nr. 4) wird der Einfluß der Zwangsventilation auf die Strömungsverhältnisse deutlich. So war es während des Holzkrippenversuches Nr. 4 möglich, während der gesamten Branddauer aus unmittelbarer Nähe (10 – 20 m vom Brandherd entfernt) das Brandgeschehen zu beobachten. Hinter der Brandlast wurde der Rauch aber so stark verwirbelt, so daß bereits fünf Minuten nach Brandbeginn der gesamte Querschnitt verraucht war. Allerdings wurde die Sicht bei dem Holzkrippenversuch Nr. 4 nicht so stark vermindert, wie bei Versuch Nr. 3 (siehe Abb. 4.5).

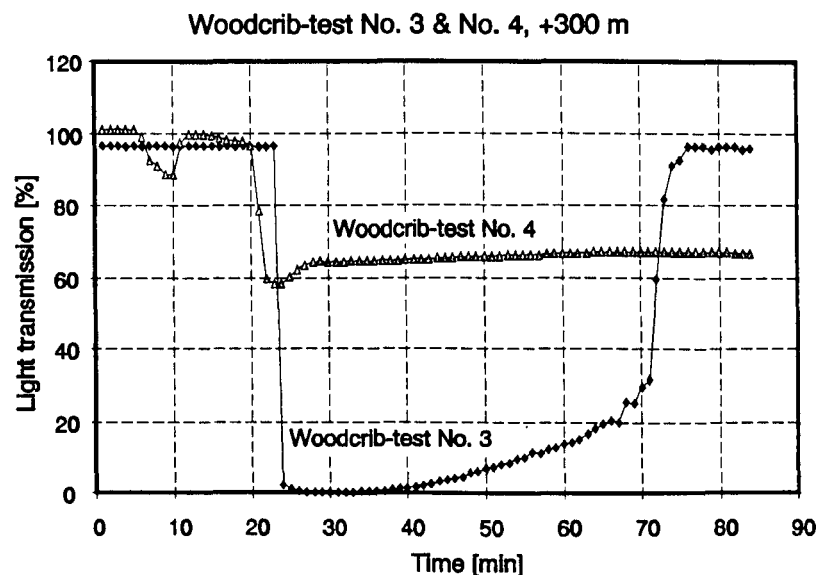


Abbildung 4.5: Meßwerte der Licht-Transmission (LT) im Querschnitt +300 m bei den Holzkrippenversuchen Nr.3 und Nr.4 in 4.5 m Höhe

Die Abb. 4.5 zeigt die gemessenen Werte der Lichttransmission aus Querschnitt +300 m in 4.5 m Höhe. Während beim Holzkrippenversuch Nr. 3 die Meßwerte ergeben, daß zwischen der 25. und 40. Minute nahezu 100 % der ausgesandten Lichtstrahlung absorbiert bzw. reflektiert wurden, so wird die Lichttransmission im Holzkrippenversuch Nr. 4 maximal um 40 % geschwächt. Durch den im Holzkrippenversuch Nr. 4 mit dem Ventilator erzeugten Kaltgasvolumenstrom hat eine Verdünnung der Heißgase mit der zugeführten Zwangsluft stattgefunden.

5 Berechnungen mit FIGARO

Für die folgenden Berechnungen wird der Bereich von -55 m bis $+55$ m des Tunnels zugrundegelegt und in neun Räume unterteilt. Der Brandherd (± 0 m) liegt in der Mitte von Raum 1, der sich somit von -5 bis $+5$ m erstreckt. Die Abmessungen der anderen Räume werden so gewählt, daß sich immer ein Meßquerschnitt in der Mitte eines Raumes befindet. Die Räume 2–5 liegen hinter der Brandlast, die Räume 6–9 sind symmetrisch dazu vor der Brandlast angeordnet. Die Aufbereitung genauerer Querschnittsdaten ist noch nicht abgeschlossen, so daß die Werte der Tab. 5.1 zugrundegelegt werden, die bereits 1990 mit einfachen Meßhilfen ermittelt wurden. Die Tab. 5.1 gibt über die Abmessungen und Lage der Räume einen Überblick.

Raum	Lage x [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Länge [m]	Fläche [m ²]
1	± 0	6.30	5.10	10	32.1
2	$+ 10$	6.40	5.30	10	33.9
3	$+ 20$	6.50	5.20	10	33.8
4	$+ 30$	6.50	5.70	10	37.1
5	$+ 45$	6.75	5.35	20	36.1
6	$- 10$	6.35	5.00	10	31.8
7	$- 20$	6.40	5.40	10	34.6
8	$- 30$	6.40	5.40	10	34.6
9	$- 45$	6.50	5.10	20	33.2

Tabelle 5.1: Abmessungen und Lage der Räume

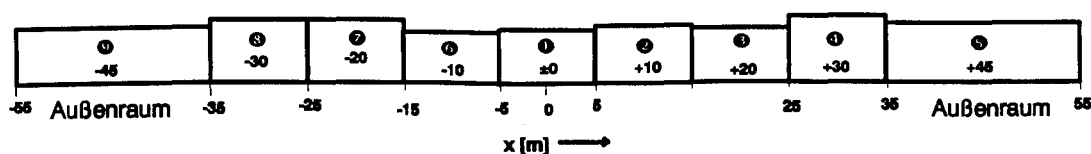


Abbildung 5.1: Tunnelgeometrie gemäß Eingabedaten

Neben den Daten für die Tunnelgeometrie werden die thermischen Stoffwerte der Wände, Decken und Boden benötigt. Hierunter fallen die Dichte ρ , die isobare Wärmekapazität c_p sowie die Wärmeleitfähigkeit λ . Die Dichte wurde im iBMB an einer Gesteinsprobe zu $\rho \simeq 2700 \text{ kg/m}^3$ bestimmt, daran orientierend wurde aus [6] $\lambda = 1.8 \text{ W/mK}$ und $c_p = 0.85 \text{ kJ/gK}$ entnommen.

Angaben zur Brandlast betreffen die Menge, die Lage im Raum, sowie den Heizwert H_u des Brandstoffes. Für die Berechnung des Sauerstoffbedarfes bei der Verbrennung wird die chemische Zusammensetzung der Brandlast benötigt.

Zur Berechnung der Energiefreisetzungsrate wird vom Programm die Vorgabe einer Abbrand- oder Pyrolyserate \dot{R} verlangt. Diese wird bei den Holzkrippenbrandversuchen und bei der Mischbrandlast durch die mit der Abbrandwaage gemessenen Werte angegeben.

Die relative Luftfeuchtigkeit φ ist eine Randbedingung, die im Eingabedatensatz vorhanden sein muß.

Der Strömungswiderstand an den Wänden ξ wird nach dem VDI-Wärmeatlas [14], Abschnitt Lb 1-2 berechnet

$$\xi = \left(\frac{1}{2 \lg(d_i/R_z) + 1.14} \right)^2 \quad (5.1)$$

Mit einem angenäherten inneren Durchmesser $d_i = 5000$ mm und einer mittleren Höhe aller Erhebungen $R_z = 200$ mm resultiert ein $\xi = 0.065$.

Ein Überblick der Eingabedaten ist aus Tab. 5.2 ersichtlich.

	Parameter	Holzkrippen- versuch Nr.3	Holzkrippen- versuch Nr.4	Mischbrand- last (LF TIR)
Decke und Boden	Dichte [kg/m ³]	2700	2700	2700
	Wärmekapazität [kJ/K kg]	0.85	0.85	0.85
	Wärmeleitfähigkeit [W/m K]	1.8	1.8	1.8
	Dicke [m]	0.3	0.3	0.3
Rel. Luftfeuchte		0.9	0.9	0.9
Abbrandrate		Abb. 6.1	Abb. 6.13	Abb. 6.21
Plume-Zonen		4	4	4
Strömungswiderstand ξ		0.065	0.065	0.065
Ventilationszahl PHIMAX		0.9	0.9	0.9
Faktor X_D [m ² /kg]		0.17	0.17	0.55
Faktor X_S [m ² /kg]		1.7	1.7	1.75

Tabelle 5.2: Weitere Eingabeparameter für die Vergleichsrechnungen

Der Parameter PHIMAX gibt vor, ab welchem berechneten Sauerstoffverhältnis (λ_{O_2} = benötigter / vorhandenem Sauerstoff) mit einem ventilationsgesteuerten Brand gerechnet werden soll. Während der ventilationsgesteuerten Brandphase kann es verstärkt zur Bildung von Kohlenmonoxid kommen.

Bei den gemessenen Temperaturen der Heiß- und Kaltgasschicht wird immer nur eine Meßstelle pro Querschnitt als Referenzwert genommen. Für die Heißgasschicht befindet sich die jeweilige Meßstelle 10 bis 20 cm unter der Tunneldecke, für die Kaltgasschicht 1 m über dem Tunnelboden. Diese Meßstellen liefern die Extremwerte der Temperaturen und mußten so gewählt werden, weil das Zonenmodell nur einen Temperaturwert für die homogenen Schichten berechnet.

6 Vergleich von Meß- und Berechnungsergebnissen

Charakteristische Größen zur Erfassung des Brandgeschehens sind die Temperaturen in der Heißgas- und in der Kaltgasschicht, die Konzentrationen der Gaskomponenten (z.B. CO_2 und CO) sowie der Dicke und Lichtdurchlässigkeit der Heißgasschicht. Diese Größen werden zum Vergleich von Versuchs- und Berechnungsergebnissen herangezogen.

6.1 Holzkrippenbrand Nr. 3

Bei diesem Versuch besteht für die ersten 25 Minuten die Möglichkeit, die Abbrandrate mittels der eingesetzten Wiegezellen zu ermitteln. Danach sind die Holzkrippenstapel zur Seite gekippt, so daß der Gewichtsverlust durch die Pyrolyse nicht mehr aufgezeichnet werden konnte. Die Simulationsrechnung wird auf die ersten 25 Minuten des Brandversuches begrenzt, um eine gesicherte Grundlage zum Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten zu haben.

6.1.1 Abbrandrate

Die für das Rechenprogramm benötigte Vorgabe der Abbrandrate für Holzkrippenversuch Nr. 3 ist in Abb. 6.1 dargestellt. Um zu den Vorgabedaten zu gelangen, werden die Meßwerte der Wiegezellen ausgewertet und die Bereiche zwischen den Meßpunkten linearisiert.

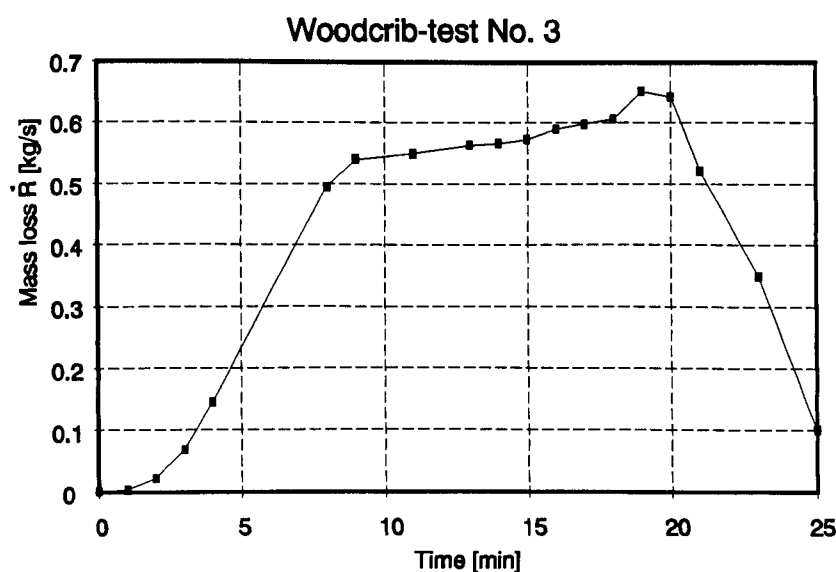


Abbildung 6.1: Holzkrippenversuch Nr. 3: Vorgabewerte der Abbrandrate \dot{R} [kg/s]

6.1.2 Temperaturen

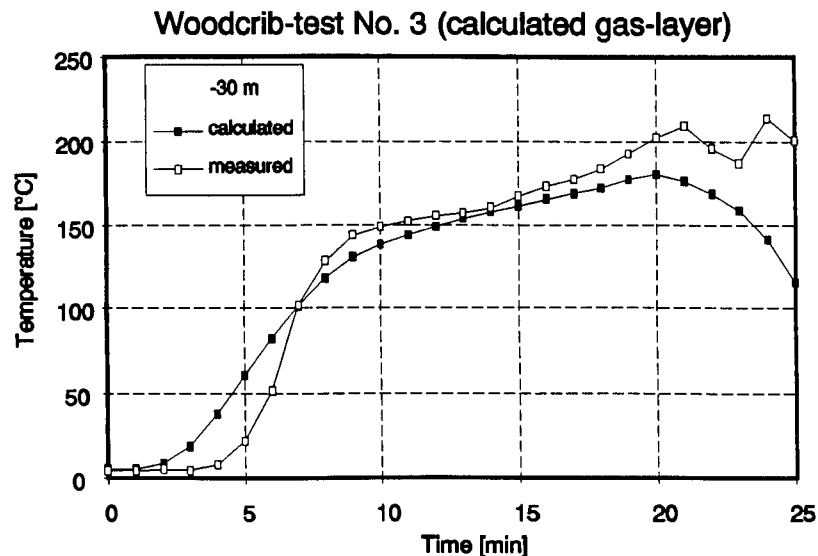


Abbildung 6.2: Holzkrippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Heißgasschicht im Querschnitt –30 m

Die berechneten und gemessenen Temperaturen in der Heißgasschicht zeigen eine gute Übereinstimmung. Tendenziell werden im Bereich hinter der Brandlast zu geringe Temperaturen berechnet, wobei die Differenz zwischen berechneter und gemessener Temperatur ca. 100 Kelvin beträgt. Im Querschnitt +10 m beträgt die maximal gemessene Temperatur knapp 500 °C und nimmt in den dahinter liegenden Querschnitten stufenweise um rd. 100 Kelvin ab.

Im Bereich vor der Brandlast wird eine sehr gute Übereinstimmung erreicht, wobei die berechneten Temperaturwerte leicht unter den gemessenen liegen. Die Temperaturen in Querschnitt –30 m sind in Abb. 6.2 dargestellt. Die vor der Brandlast gemessenen Heißgastemperaturen sind im Durchschnitt rd. 100 Kelvin niedriger als im korrespondierenden Querschnitt hinter der Brandlast. So wurde im Querschnitt –30 m in der Heißgasschicht die max. Temperatur von ca. 220 °C gemessen, im Querschnitt +30 m rd. 320 °C. Dagegen sind die berechneten Temperaturen in den Querschnitten ±30 m zeitlich und vom absoluten Betrag fast identisch.

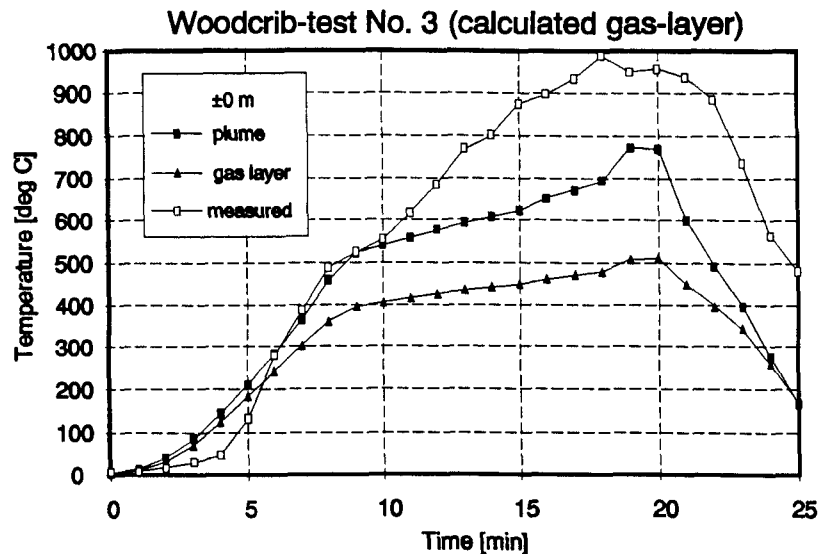


Abbildung 6.3: Holzkrippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Heißgasschicht im Brandraum

Im Raum des Brandherdes liefert die berechnete Heißgastemperatur im Vergleich zu den gemessenen Temperaturen viel zu niedrige Werte (Abb. 6.3). Die Oberkante der Brandlast befand sich auf einer Höhe von über 3 m, so daß die aus der Brandlast herausschlagenden Flammen die Tunneldecke direkt beflammt haben. Deshalb werden zum Vergleich die berechneten Temperaturwerte des Plume herangezogen.

Der Plume wird für die hier gemachten Berechnungen in vier gleichhohe Segmente unterteilt. Der Querschnitt, in dem sich die Brandlast befindet (± 0 m), hat nach Tab. 5.1 eine Höhe von 5.35 m. Daraus ergibt sich für die vier Plume-Zonen eine Teilhöhe von je 1.34 m. Mit der Höhe von 3 m befindet sich die Oberkante der Brandlast in der dritten Plume-Zone, weshalb die für die dritte Plume-Zone berechneten Temperaturwerte für den Vergleich mit den gemessenen Temperaturen eingesetzt werden.

In den ersten zehn Minuten liegt eine gute Übereinstimmung vor, danach steigt die gemessene Temperatur schneller an als die berechnete. Beide Temperaturverläufe erreichen zwischen der 18. und 19. Minute ihren Maximalwert von 1000 °C (gemessen) bzw. 775 °C (berechnet).

Vor der Brandlast werden die Temperaturen der Kaltgasschicht relativ gut simuliert. Es ist eine Tendenz zu höheren berechneten als gemessenen Werten zu erkennen. Zu keiner Zeit wird in der Kaltgasschicht vor der Brandlast innerhalb des Berechnungszeitraumes ein Meßwert über 40 °C festgestellt.

Hinter der Brandlast liegen die Meßwerte über den theoretischen Daten. Die gemessenen Temperaturwerte verringern sich von 70 °C im Querschnitt +10 m auf rd. 25 °C im Querschnitt +30 m. Im Raum der Brandlast liegt die Differenz der zu vergleichenden Kurven bei rd. 400 K ($T_{\max, \text{mess}} \approx 410^\circ\text{C}$).

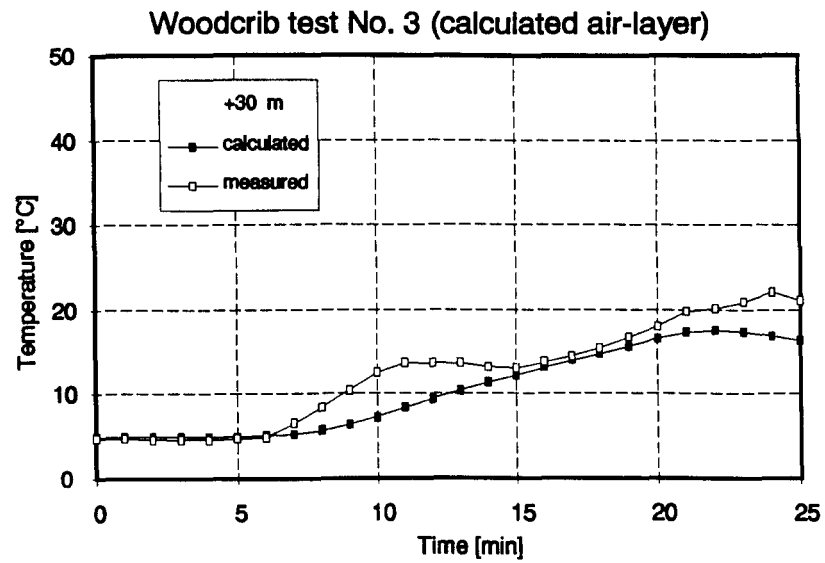


Abbildung 6.4: Holzkrippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m

6.1.3 Heißgasgrenzschicht

Die Versuchsbeobachtung hat gezeigt, daß mit zunehmender Versuchsdauer der Bereich von - 100 m bis + 100 m vollständig verqualmt. Die Abb. 4.1 gibt die Höhenlage der Heißgasschicht gemäß der Versuchsbeobachtungen vor der Brandlast wieder. Dort hat sich die Heißgasschicht in der 25. Minute auf ca. 2 m über dem Tunnelboden abgesenkt. Am Boden hat sich aus den an den Tunnelwänden herabsinkenden Heißgasen ebenfalls eine Rauchschiicht gebildet.

In Abb. 6.5 ist die Höhenlage der Rauchgasschicht für den Bereich hinter der Brandlast aus den Versuchsbeobachtungen mit der stationären Videokamera skizziert. Nach einer Versuchsdauer von rd. 11 min hat sich die Rauchgasschicht auf ca. 0.3 m über dem Tunnelboden gesenkt.

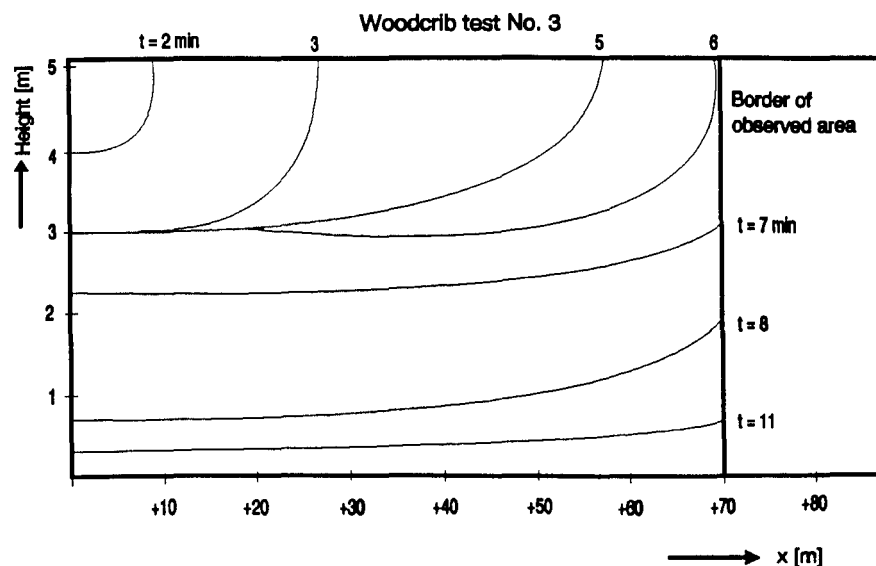


Abbildung 6.5: Holzrippenversuch Nr. 3: Höhe der Rauchschicht, ermittelt aus der Versuchsbeobachtung mit der stationären Videokamera

Woodcrib test No. 3

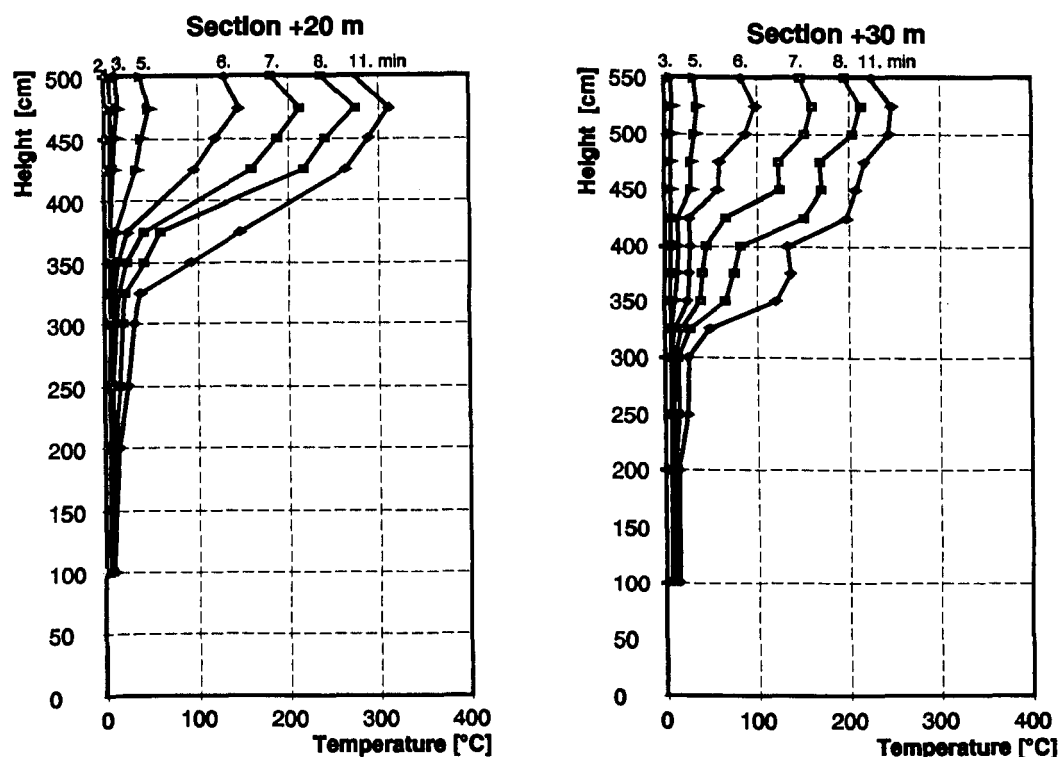


Abbildung 6.6: Holzkrippenversuch Nr. 3: Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte +20 m und +30 m zu ausgewählten Zeitpunkten

Aus Abb. 6.6 ergibt sich zur 11. Minute in den Querschnitten +20 m und +30 m eine Höhe der Heißgassgrenzschicht zwischen 3.3 und 3.5 m über der Tunnelsohle. Die in diesem Bereich zum gleichen Zeitpunkt beobachteten Sichtbeeinträchtigungen unterhalb von 3 Metern liegen somit in der Kaltgasschicht. Vermutlich haben hier Einmischungen von Rauchgasen aus der Heißgasschicht in die Kaltgasschicht ohne starke Temperaturerhöhungen stattgefunden. Es wird deutlich, daß neben einer verrauchten Heißgasschicht eine ebenfalls verrauchte Kaltgasschicht existiert. Die visuell beobachtete Rauchgasschicht ist nicht identisch mit der aus den Temperaturprofilen ermittelten Heißgasschicht. Es wird vorgeschlagen, eine sprachliche Trennung von Rauch- und Heißgasschicht vorzunehmen und die Rauchgasschicht unabhängig von Heiß- und Kaltgasschicht zu betrachten.

Die Kaltgasschicht wird durch die sich abkühlenden und absinkenden Heißgase mit Partikeln versetzt, so daß die Sicht auch unterhalb der Heißgassgrenzschicht stark beeinträchtigt wird.

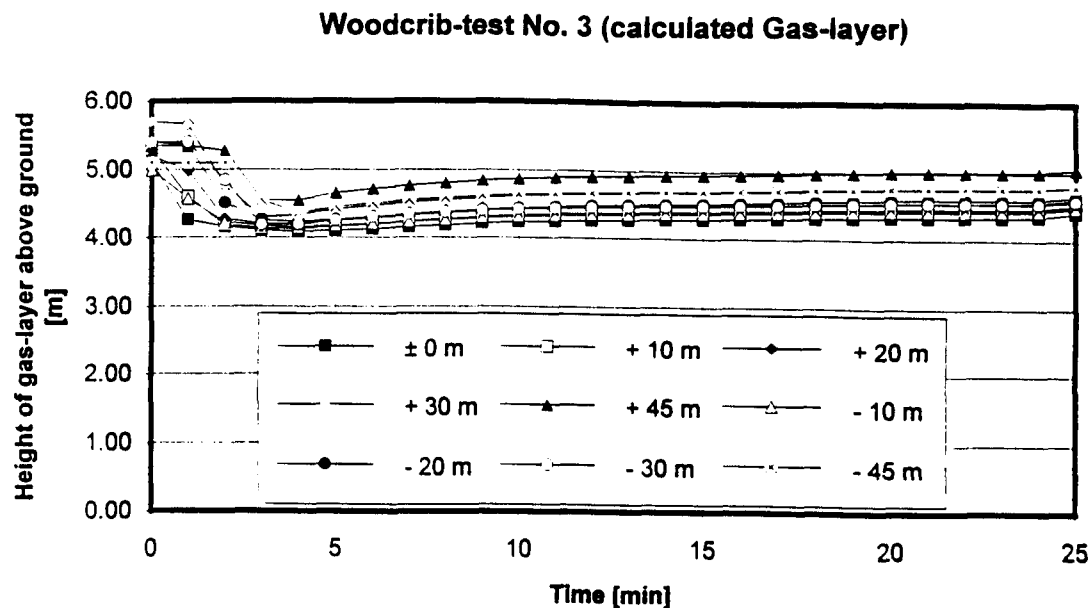


Abbildung 6.7: Holzkrippenversuch Nr. 3: Lage der berechneten Grenzschicht zwischen Heiß- und Kaltgasschicht

Die Abb. 6.7 zeigt die mit dem Programm FIGARO berechneten Werte für die Höhe der Heißgasgrenzschicht über dem Boden. Es ist zu erkennen, daß die berechnete Heißgasgrenzschicht nicht unter 4.0 m Höhe sinkt, was durch die Versuchsbeobachtungen und die Temperaturprofile nicht bestätigt wird.

Eine Einflußgröße auf die Differenz zwischen berechneter und „gemessener“ (aus Temperaturprofilen) Heißgasgrenzschicht kann die unterschiedliche Geometrie des tatsächlichen Tunnelquerschnittes im Gegensatz zu den Eingabedaten für das Berechnungsprogramm sein. Während die Berechnung von einem Rechteckquerschnitt ausgeht, ist der wirkliche Tunnelquerschnitt in den Ecken abgerundet oder abgeflacht. Die Darstellung des Tunnelquerschnittes in Abb. 3.1 zeigt einen idealisierten abgerundeten Tunnelquerschnitt.

Bei gleichen Heißgasvolumen stellt sich im Realfall eine niedrigere Höhe der Heißgasgrenzschicht über der Tunnelsohle als bei dem Rechteckquerschnitt aus den Eingabedaten ein. Ein Beispiel soll den Sachverhalt verdeutlichen.

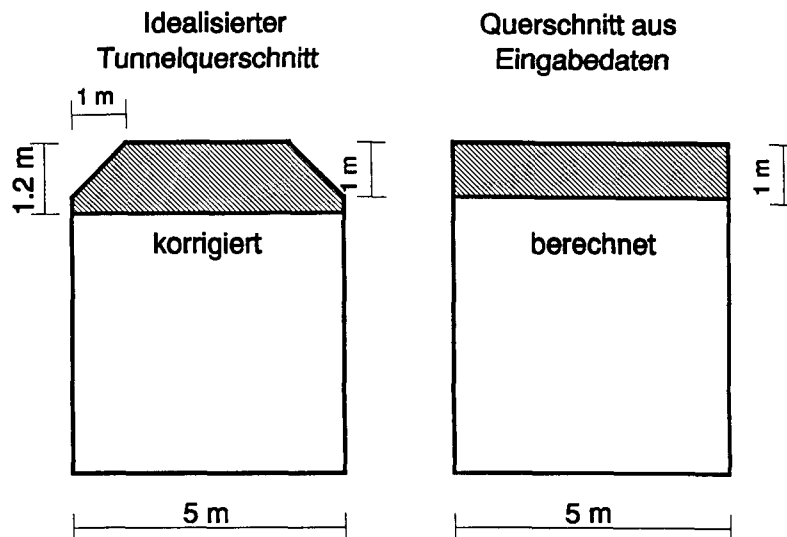


Abbildung 6.8: Idealisierter Tunnelquerschnitt und Querschnitt aus Eingabedaten

In Abb. 6.8 ist auf der rechten Seite der Querschnitt eines Volumens von $h \times b \times l = 6 \times 5 \times 1 \text{ m}^3$ dargestellt, für den eine 1 m starke Heißgasschicht berechnet wurde. Das Heißgasvolumen beträgt somit 5 m^3 . In der linken Hälfte ist ein idealisierter Tunnelquerschnitt dargestellt, der oben in den Ecken abgeflacht ist. Die durch die Fasen für den Strömungsquerschnitt fehlenden Flächen betragen im Beispiel 1 m^2 , das Volumen daher 1 m^3 . Damit dennoch das berechnete Heißgasvolumen von 5 m^3 von dem tatsächlichen Tunnelquerschnitt aufgenommen werden kann, stellt sich eine etwas stärkere Heißgasschicht ein. In diesem Beispiel liegt die Heißgasgrenzschicht gegenüber dem berechneten Wert um 0,2 m tiefer.

6.1.4 Konzentration der Verbrennungsgase

Für die Flucht aus der Gefahrenzone aus eigener Kraft ist eine Versorgung mit ausreichend Sauerstoff erforderlich. So sollten mindestens 16 Vol.-% Sauerstoff und höchstens 4 Vol.-% Kohlendioxid in der Kaltgasschicht vorhanden sein. Ebenso ist die Konzentration von Kohlenmonoxid CO von großer Bedeutung. Eine CO-Konzentration zwischen 1000 und 500 ppm (entsprechend 0,1 – 0,05 Vol.-%) führt bereits nach 15 bis 30 Minuten zu ersten Vergiftungserscheinungen (siehe auch Abschnitt 8).

Bei den Vergleichen zwischen berechneten und gemessenen Gaskomponenten in der Kalt- und in der Heißgasschicht werden als Meßwerte die Daten aus der Gasanalyse zugrundegelegt. Die Ansaugstellen befanden sich jeweils in 1,5 – 2 bzw. in 4,4 – 4,9 Meter Höhe, so daß in der Regel die erstgenannten Meßpositionen der Kaltgasschicht, die letzteren der Heißgasschicht zugeordnet werden. Durch das Herabsinken des Rauches können auch die unteren Analysestellen in den Bereich der Heißgasschicht kommen.

6.1.4.1 Kohlendioxid-Konzentration

Die CO_2 -Konzentrationen der Heißgasschicht werden als Funktion der Zeit für die Querschnitte + 10, ± 20, ± 30 m berechnet. Für die fünf Querschnitte ergeben sich aus der Berechnung annähernd die gleichen Konzentrationswerte, die vom Betrag her über denen der Meßwerte liegen. Die Abhängigkeit der Heißgasbewegung von der Zwangsventilation (hier schwache Strömung vom Portal her) wird durch die in Richtung Schacht ansteigenden CO_2 -Meßwerte, nicht aber durch die berechneten Werte wiedergegeben. Die berechneten Werte sind rd. 1.5 bis 3-fach größer als die Meßwerte ($\text{CO}_{2,\text{mess}}$ max. 6.2 Vol.-% im Querschnitt +20 m).

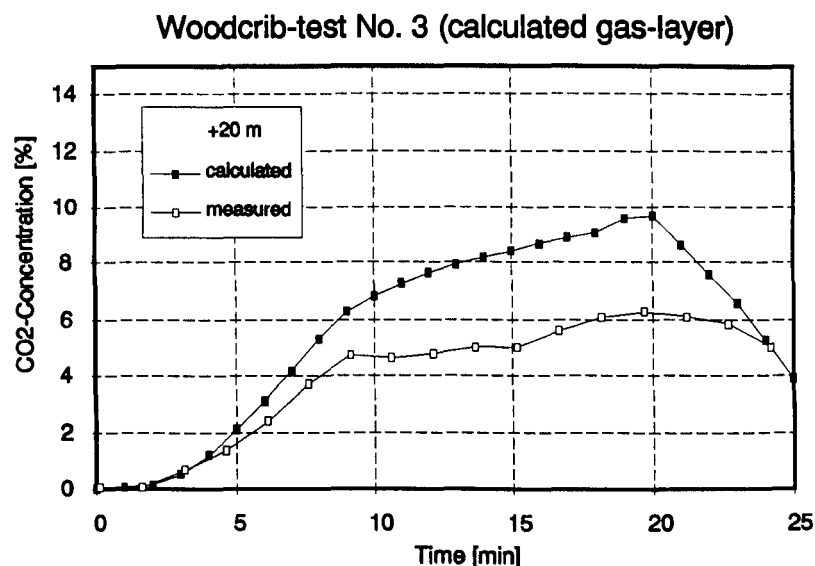


Abbildung 6.9: Holzkrippenversuch Nr. 3: CO_2 -Konzentration in der Heißgasschicht im Querschnitt +20 m

Wie aus Abb. 6.9 zu ersehen ist, ergibt die Rechnung in den ersten sieben Minuten eine relativ gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Im weiteren Verlauf stellt sich eine Differenz von bis zu +50 % über den gemessenen Werten ein.

Die berechneten Werte sind in den Querschnitten –20 m und –30 m ca. dreimal so hoch wie die Meßwerte, während hinter der Brandlast die berechneten Werte nur 2 bis 1.5-fach so groß sind, wie die gemessenen Werte.

Für die Kaltgasschicht ergeben sich ähnliche Differenzen, wobei die Meßwerte bei maximal 3.5 Vol.-% liegen. Im zeitlichen Verlauf der Meßkurven ist ein Unterschied zu den Konzentrationen in der Heißgasschicht zu sehen. In der Heißgasschicht setzt der Anstieg des gemessenen CO_2 -Gehaltes ohne nennenswerten zeitlichen Verzug gegenüber den berechneten Werten ein. In der Kaltgasschicht wird ein merklicher Anstieg des Kohlendioxides aber erst rund acht Minuten später registriert.

6.1.4.2 Kohlenmonoxid-Konzentration

Während des Versuches wurde eine maximale Konzentration in der Heißgasschicht von 0.42 Vol.-% CO (entsprechend 4200 ppm) im Querschnitt +20 m registriert.

Von den in Kopfhöhe positionierten Analysestellen wurden Werte bis maximal 920 ppm (0.092 Vol.-%) gemessen. Dieser Maximalwert wurde 20 Minuten nach der Zündung im Schnitt + 30 m erreicht.

Der Wert von 500 ppm ist im Querschnitt +30 m in der 11. min, im Querschnitt +20 m nach 15 min erreicht worden. Im Querschnitt -20 m ergab sich in der 19. Minute eine maximale Kohlenmonoxid-Konzentration von 430 ppm. Die beschriebenen Meßwerte sind in Abb. 6.10 dargestellt.

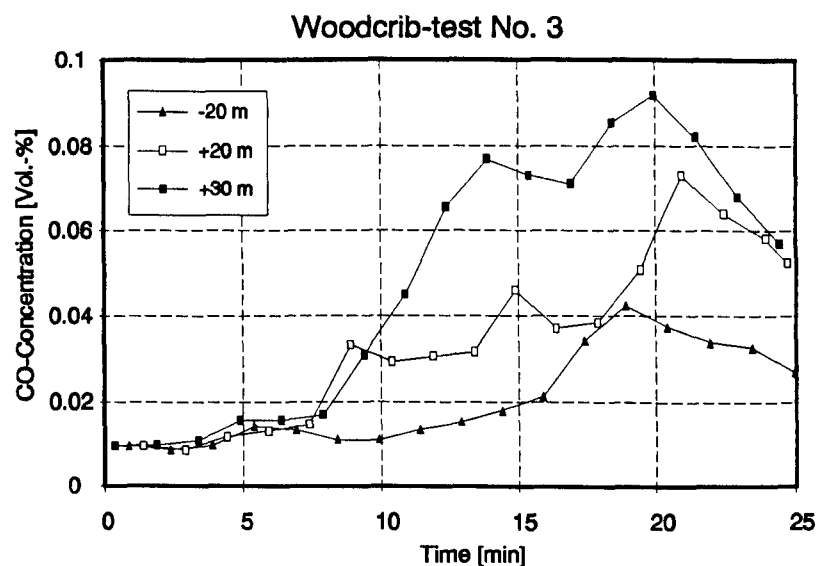


Abbildung 6.10: Holzkrippenversuch Nr. 3: CO-Konzentration in der Kaltgasschicht

Der Rechenlauf hat in der Heiß- und in der Kaltgasschicht eine CO-Konzentration von 0.0 Vol.-% ergeben.

6.1.5 Extinktionskoeffizient

In diesem Abschnitt soll auf den Extinktionskoeffizienten k nach Gl.(2.32) eingegangen werden.

Für die Heißgasschicht werden k -Werte berechnet, die mit der Entfernung vom Brandherd steigen. Die absoluten Beträge sind für gleiche Entfernung ähnlich; vor der Brandlast sind die Werte etwas höher als bei gleicher Entfernung hinter der Brandlast. 45 Meter vor/hinter der Brandlast ergeben sich maximale Werte für k um 3.2 m^{-1} , die auf rd. 1.6 m^{-1} im Brandraum abfallen.

Der Extinktionskoeffizient in der Kaltgasschicht steigt maximal auf $k = 1.3 \text{ m}^{-1}$. Dieser Wert wird im Querschnitt + 30 m erreicht und sinkt auf $k \approx 1.2 \text{ m}^{-1}$ im Brandraum

(s. Abb. 6.11). Im Querschnitt +45 m wird ein maximaler Extinktionskoeffizient von $k \approx 0.6 \text{ m}^{-1}$ berechnet.

Ähnliche Werte wie für den Brandraum werden für die Querschnitte von -10 bis -30 Meter berechnet. Der kleinste Werte von $k = 0.7 \text{ m}^{-1}$ wird im Schnitt -45 m ermittelt.

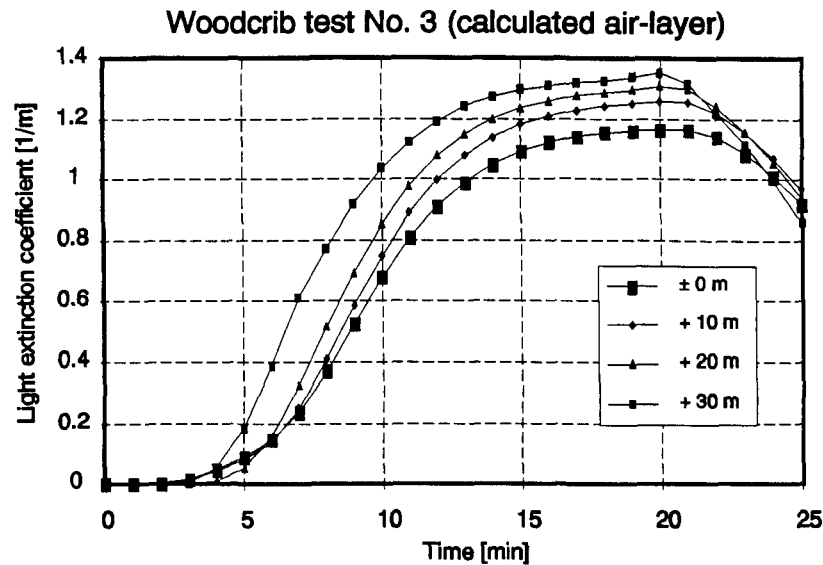


Abbildung 6.11: Holzkrippenversuch Nr. 3: Extinktionskoeffizient in der Kaltgasschicht

Diesen berechneten Werten werden die im Querschnitt $+300 \text{ m}$ gemessenen Werte gegenübergestellt. Bei der Meßstelle in 4.5 m Höhe tritt erst nach $t = 24 \text{ min}$, bei der Meßstelle in 1.5 m Höhe nach 25 Minuten eine Sichtbehinderung ein.

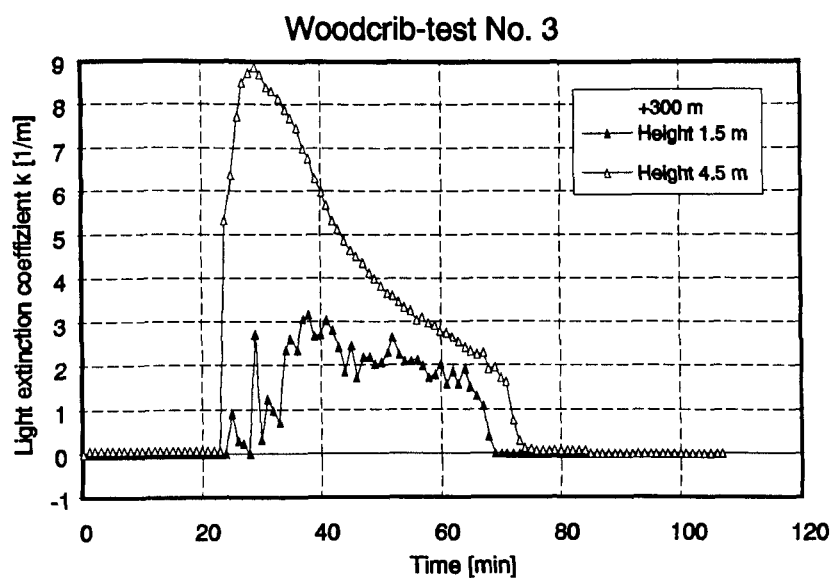


Abbildung 6.12: Holzkrippenversuch Nr. 3: Gemessener Extinktionskoeffizient k im Querschnitt $+300 \text{ m}$

Wie in Abb. 6.12 gezeigt, erreicht die Meßstelle in 450 cm Höhe nach 28 Minuten den Wert k von knapp 9 m^{-1} . Der maximale Wert an der Meßstelle auf 1.5 m Höhe, $k = 3.1 \text{ m}^{-1}$, wird ca. 10 Minuten später registriert. Die ersten gut zwanzig Minuten sind hier ohne Behinderung der Sicht, d.h. $k = 0 \text{ m}^{-1}$.

6.2 Holzkrippenbrand Nr. 4

6.2.1 Abbrandrate

Die für den Programmcode benötigte Vorgabe der Abbrandrate für Holzkrippenversuch Nr. 4 ist in Abb. 6.13 dargestellt. Um zu den Vorgabedaten zu gelangen, werden die Meßwerte der Wiegezellen ausgewertet und die Bereiche zwischen den Meßpunkten linearisiert.

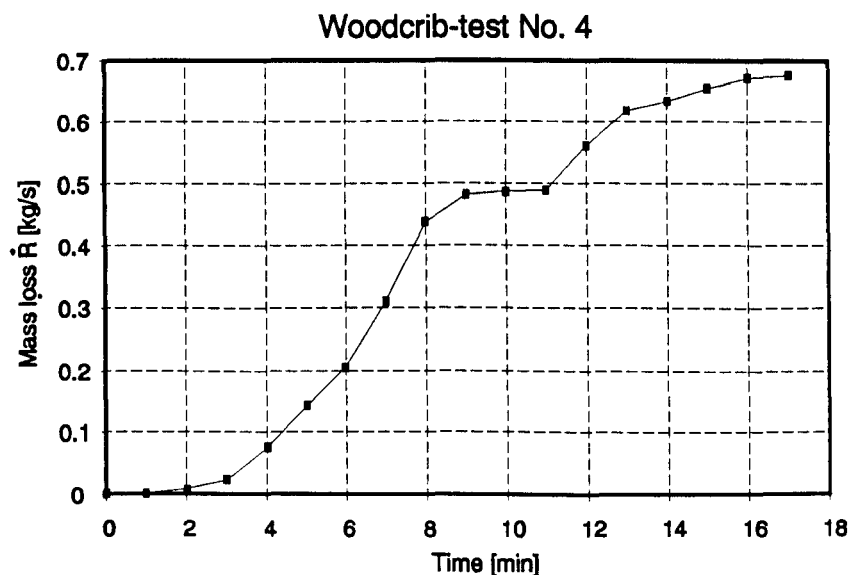


Abbildung 6.13: Holzkrippenversuch Nr. 4: Vorgabewerte der Abbrandrate \dot{R} [kg/s]

In diesem Versuch hat die Abbrandwaage in den ersten 17 Minuten gültige Meßwerte geliefert, so daß die Vorgabewerte für den Programmlauf aus Abb. 6.13 den Meßwerten entsprechen.

6.2.2 Temperaturen

Für den Bereich hinter der Brandlast werden die Temperaturwerte der Heißgasschicht in relativ guter Übereinstimmung mit den tatsächlich aufgetretenen Werten vorhergesagt. Anfangs liegen die berechneten Temperaturen über den gemessenen; nach ca. 10 Minuten sind die gemessenen Temperaturen höher als die berechneten.

Im Brandraum liegen die gemessenen Temperaturen um rd. 35 % unter den berechneten Werten. Die maximale Temperatur, die im Brandraum im 4.9 m Höhe gemessen

wurde, beträgt $T_{\max, \text{mess}} = 490^\circ\text{C}$. Wie aus den Versuchsbeobachtungen zu entnehmen ist, wurden die Flammen durch die Stärke der Kaltgasströmung in Richtung Schacht abgelenkt, und die vorderen Holzkrippenstapel haben sich nicht entzündet. Weil die Thermoelemente im Brandraum über der Mitte der Brandlast angeordnet waren, konnte die Erwärmung durch die Flammen nicht direkt erfaßt werden. Deshalb steigt die gemessene Temperatur in 4.90 m Höhe im Brandraum nicht so hoch wie im Holzkrippenversuch Nr. 3.

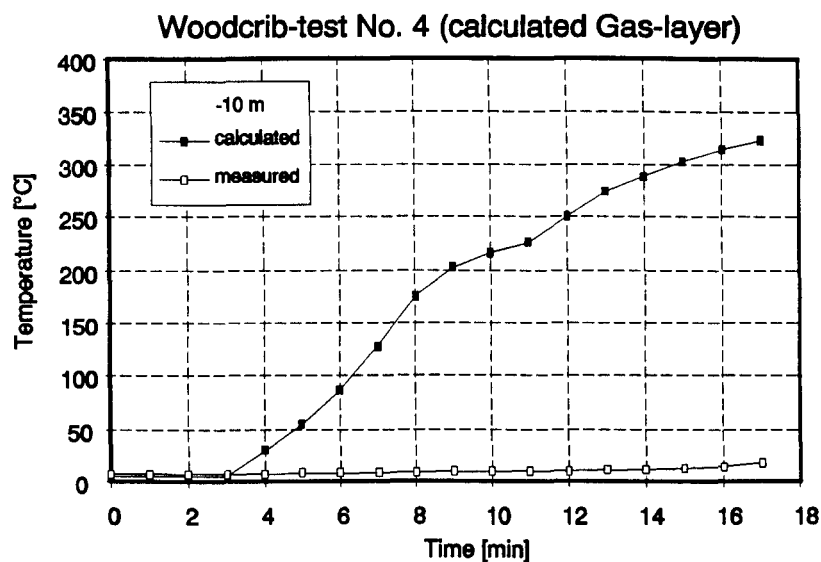


Abbildung 6.14: Holzkrippenversuch Nr. 4: Temperaturentwicklung in der Heißgasschicht im Querschnitt –10 m

Im Bereich vor der Brandlast weichen die gemessenen Temperaturen in der Heißgasschicht stark von den berechneten Temperaturen ab. Im Versuch wurde keine nennenswerte Temperaturerhöhung festgestellt (max 18 °C in den ersten 17 Minuten im Querschnitt –10 m in 4.80 m Höhe auf der linken Seite), während durch die Berechnung für den gleichen Querschnitt eine Erwärmung auf rd. 320 °C vorhersagt wird (s. Abb. 6.14).

In der Kaltgasschicht werden für die Querschnitte –45 bis –10 m die zutreffenden Temperaturen berechnet. Die vorhandene kleine Differenz von ca. 4 Kelvin ergibt sich aus der Tatsache, daß das Programm von einer Umgebungstemperatur 5 °C ausgeht, während zu Versuchsbeginn rd. 9 °C herrschten. Die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = T_{\text{mes}} - T_{\text{calc.}} \quad (6.1)$$

wird für den Bereich –10 bis –45 m in der Abb. 6.15 dargestellt.

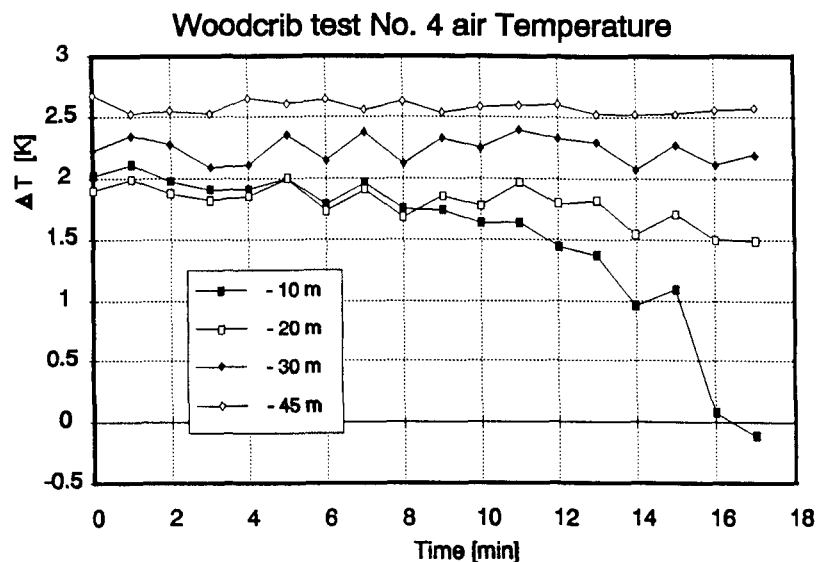


Abbildung 6.15: Holzkrippenversuch Nr. 4: Temperaturdifferenz nach Gl. 6.1 in der Kaltgasschicht vor der Brandlast

Im Bereich von -45 bis -10 m wird die Abweichung zwischen gemessener und berechneter Temperatur nicht größer als 3 Kelvin.

Eine etwas größere Abweichung mit $\Delta T = \pm 8$ Kelvin stellt sich hinter der Brandlast ein.

6.2.3 Heißgasgrenzschicht

Die berechneten Werte für die Höhe der Heißgasgrenzschicht über dem Boden sind aus Abb. 6.16 ersichtlich.

Zu beiden Seiten der Brandlast sinkt die Heißgasgrenzschicht nicht unter eine Höhe von 4 m über dem Boden. Wie schon bei den Temperaturen in der Heißgasschicht zu erkennen ist, wird der zugeführte Kaltgasvolumenstrom vom Programm nicht richtig umgesetzt. Die vom Programm berechnete Heißgasbewegung in Richtung Portal ist während des Versuches nicht eingetreten.

Auch der Bereich hinter der Brandlast wird nicht korrekt berechnet. Aus den Beobachtungen mit der stationären Videokamera geht hervor, daß keine ausgeprägte Rauchgasgrenzschicht vorhanden ist und sich die Rauchgase über die ganze Tunnelhöhe ausbreiten.

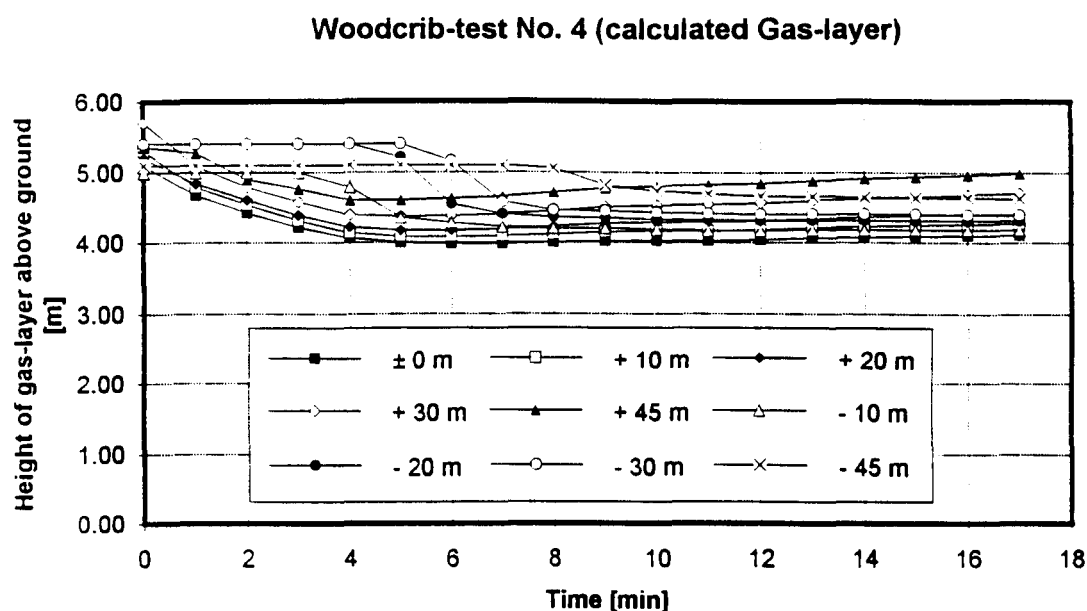


Abbildung 6.16: Holzkrippenversuch Nr. 4: Lage der berechneten Grenzschrift zwischen Heiß- und Kaltgasschicht

6.2.4 Konzentration der Verbrennungsgase

6.2.4.1 Kohlendioxid-Konzentration

Die CO_2 -Konzentration in der Heißgasschicht erreicht in der Berechnung nach rd. 17 Minuten in allen Räumen einen Wert von ca. 8 Vol.-%, unabhängig davon, ob der Raum vor oder hinter der Brandlast liegt.

Unterschiedlich ist der Zeitpunkt, zu dem ein deutlicher Anstieg der Konzentration berechnet wird. Vor der Brandlast verzögert sich die Konzentrationszunahme an Kohlendioxid mit wachsender Entfernung zum Brandherd. In diesem Bereich wurde allerdings nur eine minimale Erhöhung des CO_2 -Gehaltes gemessen.

Hinter der Brandlast sind bei den berechneten Werten sowohl Zeitpunkt der CO_2 -Zunahme als auch Konzentrationswert für alle Räume fast identisch.

Die Charakteristik von berechnetem und gemessenem Konzentrationsverlauf ist ähnlich. Allerdings liegen die berechneten Konzentrationen um das 2,5-fache höher als die Meßwerte.

Für die Kaltgasschicht vor dem Brandherd gilt ähnliches wie für die Heißgasschicht. Hier werden CO_2 -Werte bis zu 0.7 Vol.-% berechnet, die Messungen ergeben max. 0.1 Vol.-%. Auch für die Kaltgasschicht gilt, daß ein um zwei Drittel geringerer berechneter Wert die gemessenen Gaskonzentrationen wesentlich realer wiedergeben würde.

Hinter der Brandlast wurden maximal 0.3 Vol.-% CO_2 in der Kaltgasschicht festgestellt. Berechnet wurden eine größte Konzentration von 1.1 Vol.-% (vergl. Abb. 6.17).

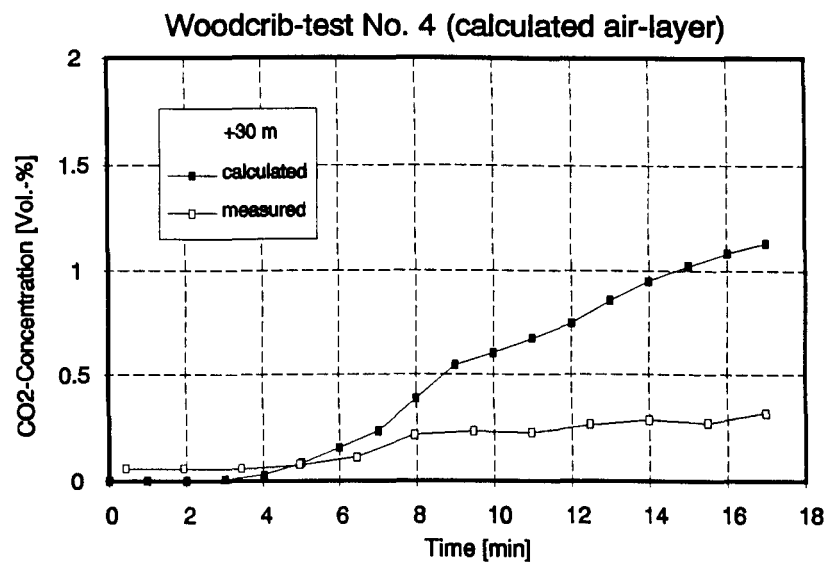


Abbildung 6.17: Holzkrippenversuch Nr. 4: CO₂-Konzentration in der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m

6.2.4.2 Kohlenmonoxid-Konzentration

Stromauf liegt die CO-Konzentration in der Heißgasschicht konstant bei 0.01 Vol.-% (Querschnitt –20 m). Hinter der Brandlast wird nur kurzzeitig ein maximaler Wert von 700 ppm registriert, so daß die Heißgasschicht bezüglich der CO-Konzentration als relativ ungefährlich gelten kann.

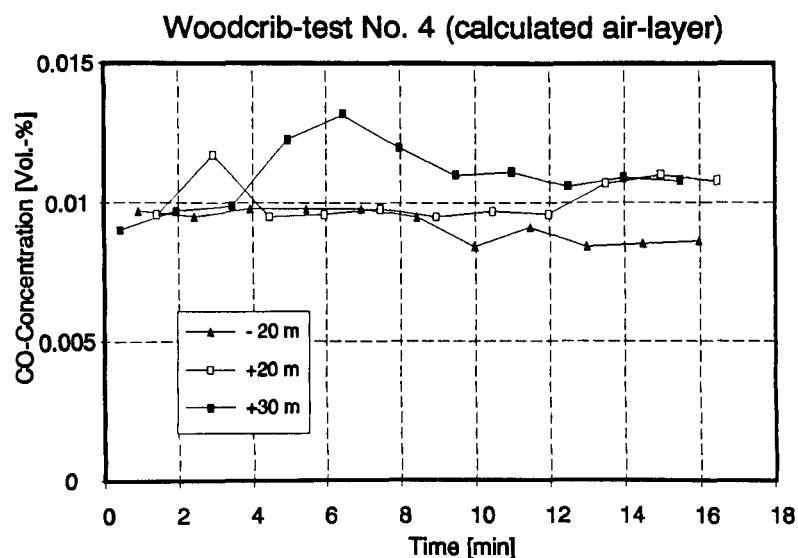


Abbildung 6.18: Holzkrippenversuch Nr. 4: CO-Konzentration in der Kaltgasschicht der Querschnitte ± 20 m und +30 m

Die Kaltgasschicht ist mit max. 100 ppm (0.013 Vol.-%) Kohlenmonoxid vor und hinter der Brandlast als unbedenklich einzustufen (siehe Abb. 6.18).

Die mit dem Rechenprogramm vorhergesagten Werte ergeben keine Erhöhung der CO-Konzentration zum Anfangsgehalt.

6.2.5 Extinktionskoeffizient

Im vorgegebenen Zeitraum ist ein Extremwert für den berechneten Extinktionskoeffizienten k weder in der Heißgas- noch in der Kaltgasschicht zu erkennen. Im Querschnitt -45 m wird für die Heißgasschicht der größte Wert von $k = 3.1 \text{ m}^{-1}$ erzielt. Der Wert für k nimmt mit wachsendem Abstand zum Brandherd zu, wobei in den Querschnitten, die stromauf von der Brandlast liegen, ein höherer Wert berechnet wird, als für die Querschnitte in gleicher Entfernung auf der dem Schacht zugewandten Seite liegen. Allerdings steigt k auf der dem Portal zugewandten Seite zu einem späterem Zeitpunkt an als in den hinter der Brandlast liegenden Querschnitten. Der kleinste Wert nach 17 Minuten Branddauer wird mit $k = 1.3 \text{ m}^{-1}$ für den Brandraum berechnet.

In der Kaltgasschicht steigt k auf maximal 0.48 m^{-1} im Querschnitt $+30$ m. Der Bereich von -20 bis $+20$ Meter wird mit 0.27 m^{-1} vorhergesagt, während in einer Entfernung von 45 Meter stromauf vom Brandraum mit keiner nennenswerten Sichttrübung gerechnet wird. Die berechneten Werte k der Kaltgasschicht für den Bereich vor der Brandlast sind in Abb. 6.19 dargestellt.

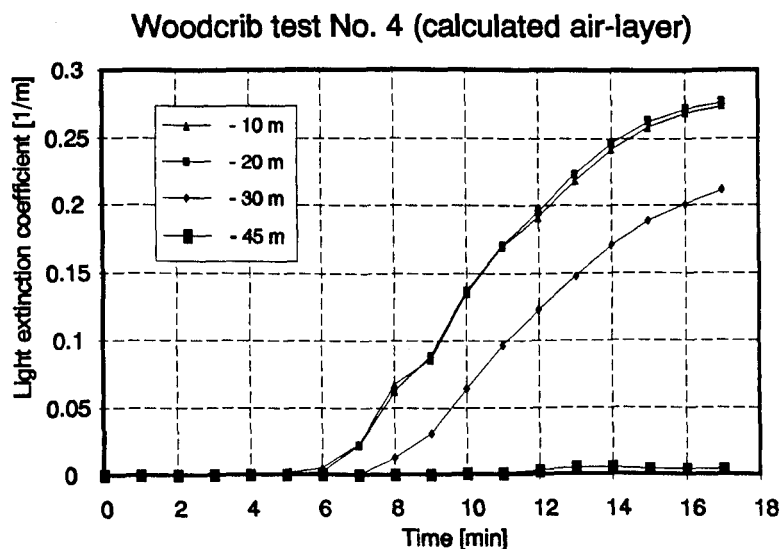


Abbildung 6.19: Holzkrippenbrandversuch Nr. 4: Berechnete Extinktionskoeffizienten k der Kaltgasschicht im Bereich vor der Brandlast

Bei den gemessenen Daten beginnt die Eintrübung 300 Meter hinter der Brandlast zur fünften Minute nach Meßbeginn. Der hier in den ersten 17 Minuten maximal erreichte Extinktionskoeffizient am oberen Meßpunkt beträgt $k = 0.19 \text{ m}^{-1}$.

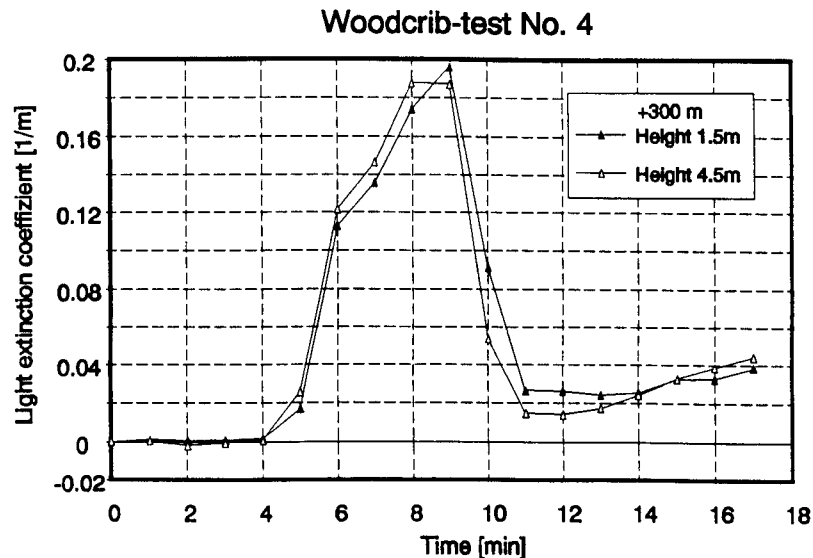


Abbildung 6.20: Holzkrippenbrandversuch Nr. 4: Gemessener zeitabhängiger Verlauf des Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m

Nach Abb. 6.20 ergibt sich fast der gleiche Verlauf für die untere Meßstelle. Die gleichen Werte sind durch die starke Vermischung der beiden Schichten infolge der relativ starken Zuluftströmung zu erklären. In diesem Versuch ist die deutliche Trennung von Heiß- und Kaltgasschicht, wie sie das Simulationsmodell vorsieht, anhand des Extinktionskoeffizienten nicht mehr zu erkennen. Die Größenordnung der Sichtbehinderung in der berechneten Kaltgasschicht stimmt mit den gemessenen Werten relativ gut überein. Zu beachten ist hierbei aber, daß zwischen Meßwert und berechnetem Wert eine Distanz vom rd. 300 m liegt.

6.3 Mischbrandlast LF TIR

Mit der Mischbrandlast ergibt sich gegenüber den Holzkrippen die Änderung, daß sich die Brandlast aus verschiedenen Stoffen zusammensetzt.

Für eine Berechnung mit dem Programm FIGARO wird vorausgesetzt, daß es sich bei dem Brandgut um einen Stoff mit homogener Zusammensetzung handelt. Dies ist bei den Holzkrippen auch der Fall. Die Mischbrandlast setzt sich dagegen aus drei verschiedenen Komponenten zusammen. Bei diesen Komponenten handelt es sich im einzelnen um 2212 kg Holz, 331 kg Autoreifen sowie 310 kg Plastik (Polyethylen PE). Für die Eingabe in das Programm müssen der Heizwert H_u , sowie die spezifischen Rauchpotentiale x_d (Verbrennung) und x_s (Verschmelzung) der einzelnen Komponenten der Mischbrandlast zu einer Mischung, nach Massenanteilen gewichtet, addiert werden. Für den Abbrand der Brandlast wird dabei unterstellt, daß zu jedem Zeitpunkt die gleiche Mischung der einzelnen Komponenten pyrolysiert wird.

Weil nur für eine begrenzte Anzahl von Stoffen die Angaben für die spezifischen Rauchpotentiale vorliegen, müssen hier Annahmen getroffen werden. So werden beim Polyethylen die spezifischen Rauchpotentiale von PVC zugrundegelegt. Für die Autoreifen

werden die Werte aufgrund des hohen Kohlenstoffgehaltes noch höher geschätzt. Der Heizwert H_u wird mit 30,000 kJ/kg angenommen.

Um einen Eintrag für die Summenformel der Mischbrandlast tätigen zu können, wurde das Verhältnis C : H : O solange variiert, bis die Summe der Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff der einzelnen Komponenten ungefähr gleich dem Massenanteil des entsprechenden Stoffes in der Mischung ist.

Die daraus resultierenden Eingabedaten sind in der Tab. 6.1 zusammengestellt.

Wie aus dem Abschnitt 4.1.3 zu entnehmen ist, schließen die Autoreifen die Brandlast nach oben hin ab. Die Zündgefäße werden unter die Brandlast gestellt, so daß die Reifen erst zu einem späteren Zeitpunkt einen Beitrag zur Energiefreisetzung und Rauchentstehung leisten. Diese Tatsache ist bei der individuellen Betrachtung der Berechnungen, die auf einem homogenen Abbrand beruhen, zu berücksichtigen.

Stoff	Gewicht [kg]	Heizwert [kJ/kg]	Summenformel $C_nH_mO_o$	x_d [m ² /kg]	x_s [m ² /kg]
Holz	2212	15200	$C_6H_{10}O_5$	0.17	1.7
Autoreifen	332	30000	C_8H_8	2.0	2.0
Plastik PE	310	46500	C_2H_4	1.7	1.8
Mischung	2854	20321	$C_{10}H_{16}O_5$	0.59	1.75

Tabelle 6.1: Zusammensetzung der Mischbrandlast LF TIR

Die für die Eingabe in das Programm ebenfalls benötigten Strömungsgeschwindigkeiten der Kaltgasschicht, die durch die Zwangsventilation entstehen, wurden aus den in Tab. 4.1 Volumenströmen \dot{V} und den entsprechenden Querschnittsflächen A aus Tab. 5.1 berechnet. Hier gilt

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (6.2)$$

6.3.1 Abbrandrate

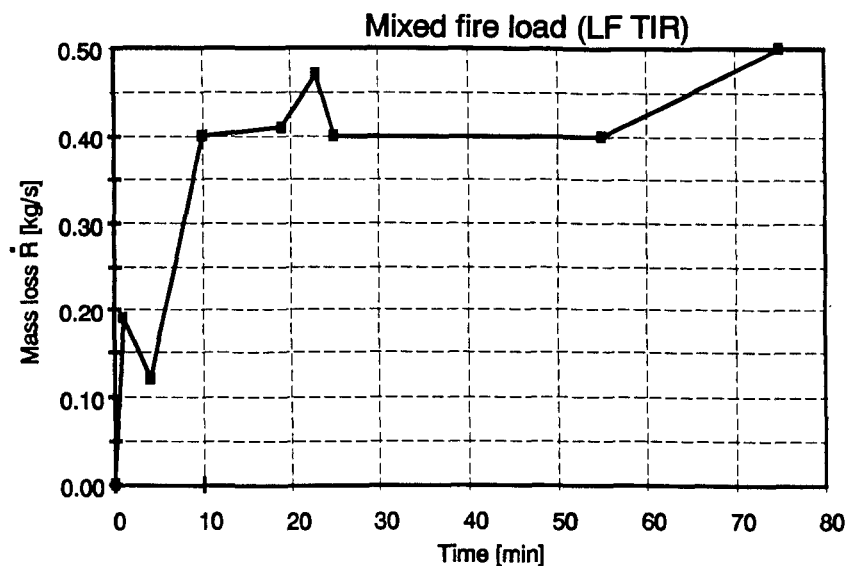


Abbildung 6.21: Mischbrandlast (LF TIR): Abbrandrate

Die bis zur 75. Minute gemessene Abbrandrate wird für die Simulationsrechnung durch acht Geradenabschnitte aufbereitet. Im Abb. 6.21 sind die Abschnitte linear zur Kurve \dot{H} verbunden.

6.3.2 Temperaturen

Die Temperaturen in der Heißgasschicht werden für den Bereich -45 bis -20 m gut vorhergesagt, wobei die berechneten Werte leicht über den gemessenen Temperaturwerten liegen. Wie in Abb. 6.22 dargestellt, wird im Querschnitt -10 m in den ersten 15 Minuten der Temperaturverlauf sehr gut wiedergegeben; anschließend liegen die berechneten Temperaturen ca. 100 Kelvin über den gemessenen.

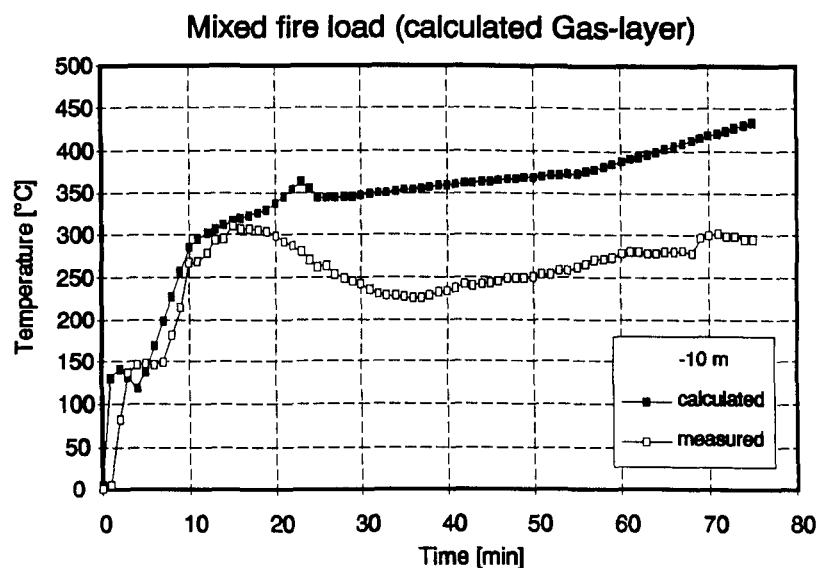


Abbildung 6.22: Mischbrandlast (LF TIR): Temperaturen der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m

Für den Vergleich der Temperaturen im Brandraum wurde die Plume-Temperatur der vierten (oberen) Zone herangezogen. Bis zur 10. Minute stimmen Rechen- und Meßwerte gut überein, danach werden die gemessenen Maximalwerte zwischen der 10. und 22. Minute rechnerisch nicht erreicht. Ab der 26. Minute liegen die Meßwerte rd. 100 Kelvin unterhalb der rechnerischen Werte.

Im Bereich hinter der Brandlast wird eine zu starke Abkühlung der Heißgase simuliert. In den Querschnitten +10 und +20 m liegen die berechneten Werte ab der 30. Minute noch über den gemessenen, doch ab +30 Meter werden die gemessenen Temperaturen der Heißgasschicht rechnerisch nicht mehr erreicht; im Querschnitt +45 m beträgt die Temperaturdifferenz, wie in Abb. 6.23 dargestellt, ca. 50 Kelvin.

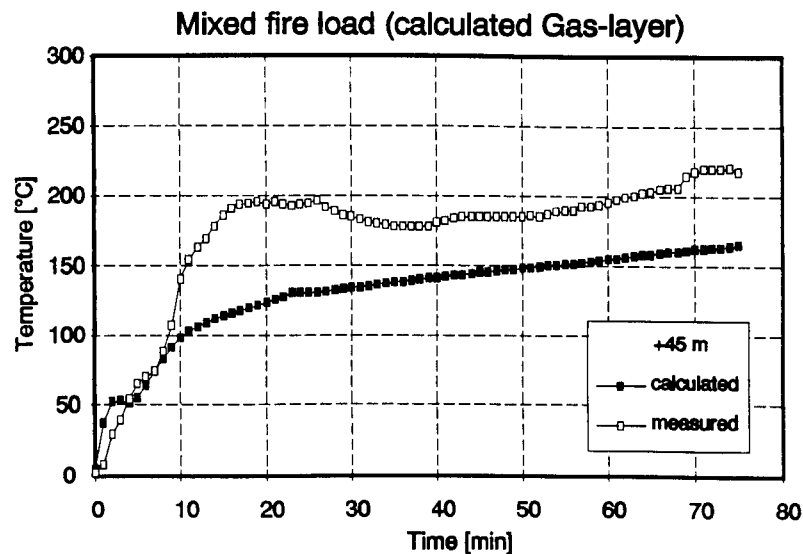


Abbildung 6.23: Mischbrandlast (LF TIR): Temperatur der Heißgasschicht im Querschnitt +45 m

Die berechneten Temperaturen in der Kaltgasschicht sind im Bereich vor der Brandlast höher als die gemessenen Temperaturen; im Brandraum sind die berechneten Temperaturen zu gering, und hinter der Brandlast gleichen sich die Temperaturen mit zunehmender Entfernung von der Brandlast an.

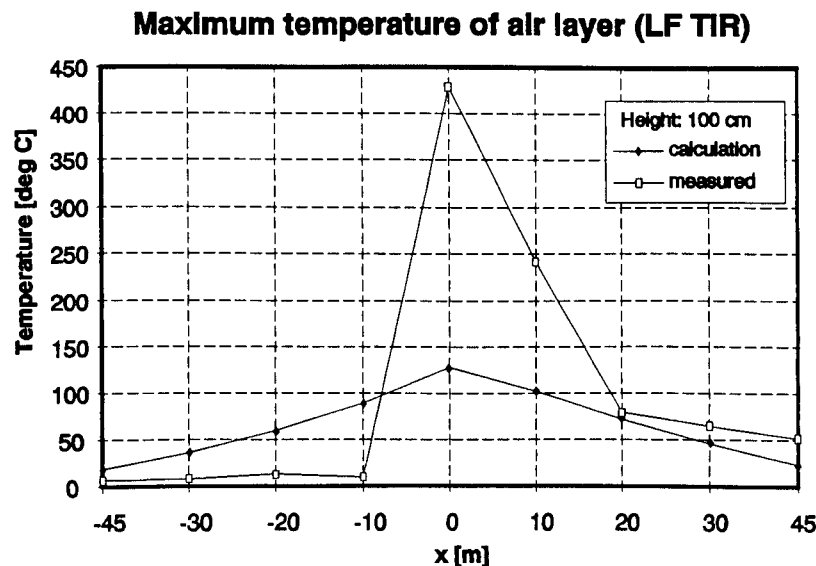


Abbildung 6.24: Mischbrandlast (LF TIR): Maximale Temperaturen in der Kaltgasschicht, gemessene Temperaturen auf der Höhe 100 cm

Die Abb. 6.24 zeigt die maximalen Temperaturen, die bis zur 75. Minute in der Kaltgasschicht aufgetreten sind. Bei den Meßwerten handelt es sich um die Temperaturen, die 1 m über dem Tunnelboden gemessen wurden. In den Querschnitten –10 bis

+10 m wurde eine aus den auf der linken und rechten Seite befindlichen Meßstellen gemittelte Temperatur zum Vergleich herangezogen. Hierbei ist zu beachten, daß sich die Temperaturen auf den beiden Seiten sehr unterschiedlich entwickelt haben. Für die Meßhöhe von $h = 1\text{ m}$ wurden auf der linken Seite des Tunnels im Querschnitt $\pm 0\text{ m}$ Temperaturen bis zu $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen (siehe Abb. 8.3), während auf der rechten Seite in 1 m Höhe Temperaturen nur bis ca. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen wurden.

Die max. Temperaturen aus der Simulationsrechnung wurden alle in der 75. Minute erreicht, während bei den gemessenen Temperaturen die Zeitpunkte unterschiedlich sind. In den Querschnitten -20 und -10 m , sowie in den Querschnitten $+20$ bis $+45\text{ m}$ wird der Maximalwert zwischen der 70. und 73. Minute erreicht. In den Querschnitten -45 und -30 , sowie ± 0 und $+10\text{ m}$ liegt das Maximum zwischen der 11. und 17. Minute.

6.3.3 Heißgasgrenzschicht

Die Abb. 6.25 gibt die berechnete Lage der Grenzschicht zwischen der Heiß- und Kaltgasschicht vor der Brandlast wieder. Die maximale Dicke der Heißgasschicht von rd. 1 m wird ungefähr für die 5. Minute berechnet. Damit befindet sich die Heißgasgrenzschicht gut 4 m über dem Tunnelboden.

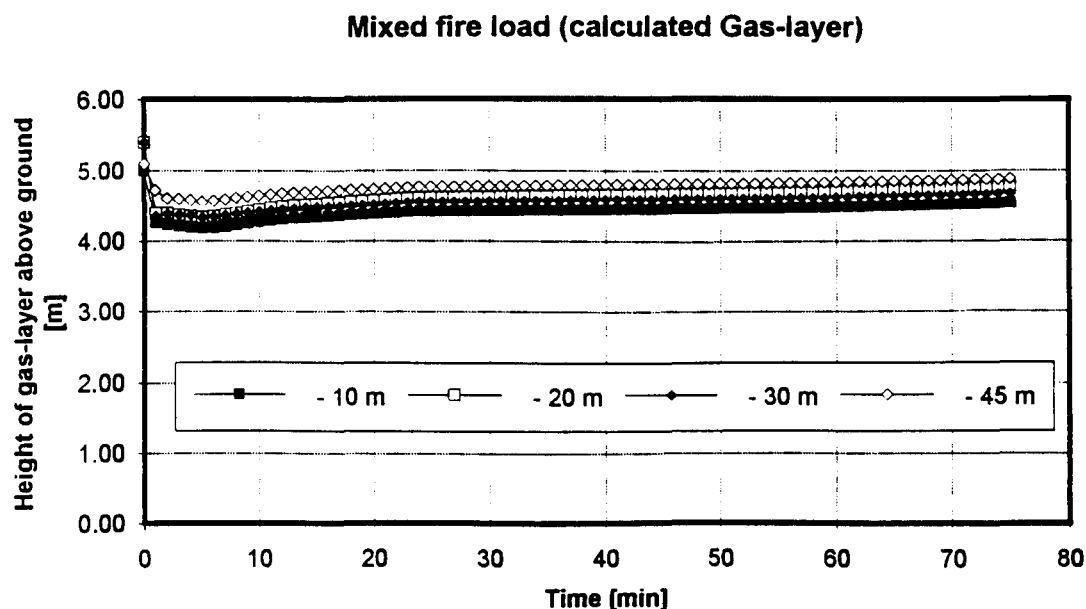


Abbildung 6.25: Mischbrandlast (LF TIR): Lage der rechnerischen Heißgasgrenzschicht vor der Brandlast

In der Abb. 6.26 sind beispielhaft die in der Mitte der Querschnitte -20 m und -45 m gemessenen Temperaturverläufe über der Tunnelhöhe zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Wird für die Heißgasgrenzschicht das Kriterium angesetzt, daß über diese Grenze hinweg ein großer Temperaturgradient verläuft, so könnte sich die Grenzschicht im Querschnitt -20 m gemäß Abb. 6.26 zur 72. Minute auf einer Höhe von rd. 3.3 m

befinden. Die Abweichung des maximalen Rechenwertes beträgt somit nur knapp 1 Meter. In der 14. Minute befindet sich die Heißgasgrenzschicht im Querschnitt –45 m in einer Höhe zwischen drei und vier Meter, während aus der Berechnung eine Höhe über dem Tunnelboden von rd. 4.8 m hervorgeht.

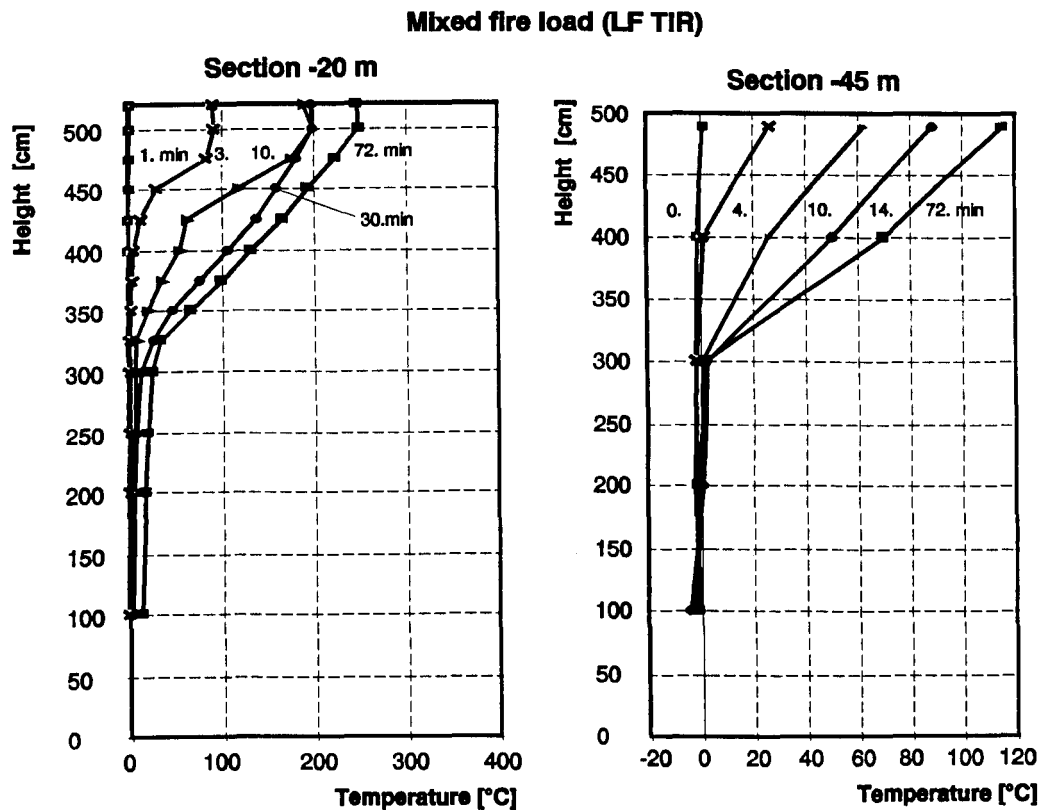


Abbildung 6.26: Mischbrandlast (LF TIR): Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte –20 m und –45 m zu ausgewählten Zeitpunkten

In Abb. 6.27 ist die Lage der Rauchgasgrenzschicht vor der Brandlast, entsprechend der Versuchsbeobachtungen, skizziert. Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, daß die Rauchgase in der 4. Minute den Querschnitt –45 m gerade erreicht haben, während für diesen Zeitpunkt die berechnete Heißgasschichtdicke fast ihre maximale Stärke erreicht hat.

Die aus Abb. 6.26 abgeleitete Höhe der Heißgasgrenzschicht vor der Brandlast, bzw. die Dicke der Heißgasschicht, steht in guter Übereinstimmung mit der aus den Versuchsbeobachtungen gemittelten Rauchgasschicht, die in Abb. 6.27 dargestellt ist. In beiden Fällen beträgt die Dicke der Schicht ca. 2 m.

Aus den Versuchsbeobachtungen geht hervor, daß die Rauchausbreitung in Richtung Portal in der 21. Minute im Querschnitt –115 m zum Stillstand kommt. Tatsächlich werden im Querschnitt –150 m während der gesamten Aufzeichnungszeit von 174 Minuten keine Temperaturänderungen registriert. Der zugeführte Luftvolumenstrom von

ca. $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hat bei dieser Brandlast ausgereicht, um die Rauchausbreitung in eine Richtung rd. 120 m von der Brandlast entfernt zu stoppen.

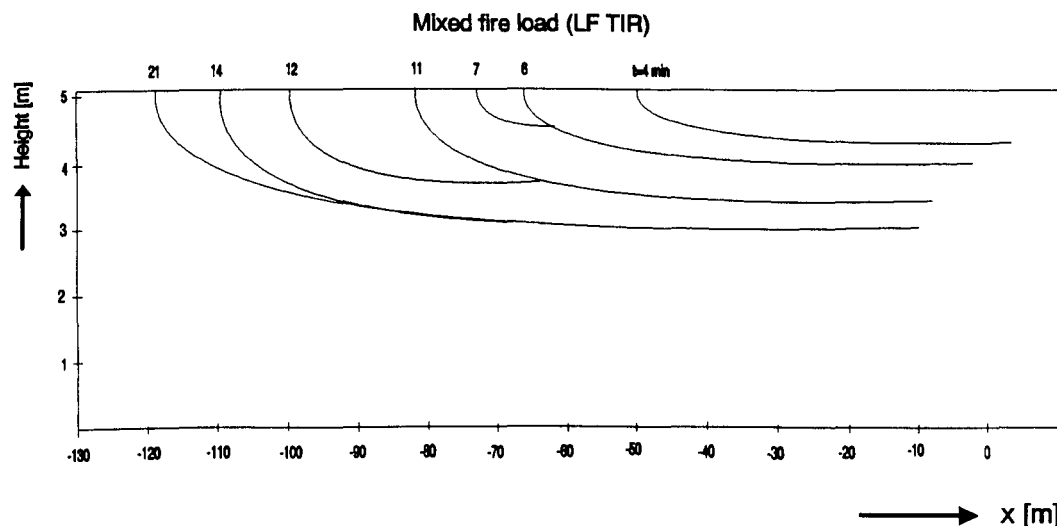


Abbildung 6.27: Mischbrandlast (LF TIR): Aus den Versuchsbeobachtungen gemittelte Lage der Rauchgasgrenzschicht vor der Brandlast

Im Bereich hinter der Brandlast, d.h. stromabwärts, liegt in den Querschnitten +20 m und +30 m bis zur 8. Minute die Grenze der Heißgasschicht zwischen 2.5 und 3 m (vergl. Abb. 6.29). Ab der 11. Minute lassen die Temperaturprofile keine Grenze zwischen Heiß- und Kaltgasschicht mehr erkennen.

Aus den Versuchsbeobachtungen mit der stationären Videokamera geht hervor, daß im Bereich hinter der Brandlast die Rauchgase bereits in der 4. Minute auf einen Meter über dem Tunnelboden herabgesunken sind (s. Abb. 6.28) und zu einer Sichtweite Null führen. Allerdings ist ab der 3. Minute keine Rauchgasgrenzschicht mehr zu erkennen. Die Auswertungen der österreichischen Meßdaten, die mit einer im Querschnitt +105 m installierten Infrarot-Kamera aufgenommen wurden, ergeben für den Bereich zwischen +20 und +60 m, daß bereits innerhalb der ersten Minute die an der rechten Tunnelwand angebrachten Reflektorplatten über die gesamten Tunnelhöhe nicht mehr zu erkennen sind. Diese Differenz zu den Auswertungen mit der stationären Videokamera kann der unterschiedliche Aufstellort der Kameras sein oder kann in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, die zur Bildaufzeichnung benutzt werden, begründet sein.

Die für den Bereich vor der Brandlast gefundene relativ gute Übereinstimmung der beobachteten Rauchgasschichtdicke mit der aus den Temperaturprofilen ersichtlichen Heißgasschicht ist hinter der Brandlast nicht vorhanden.

Der Programmlauf berechnet für den Bereich hinter der Brandlast ähnliche Werte wie für die Querschnitte vor der Brandlast, die somit der Realität nicht entsprechen.

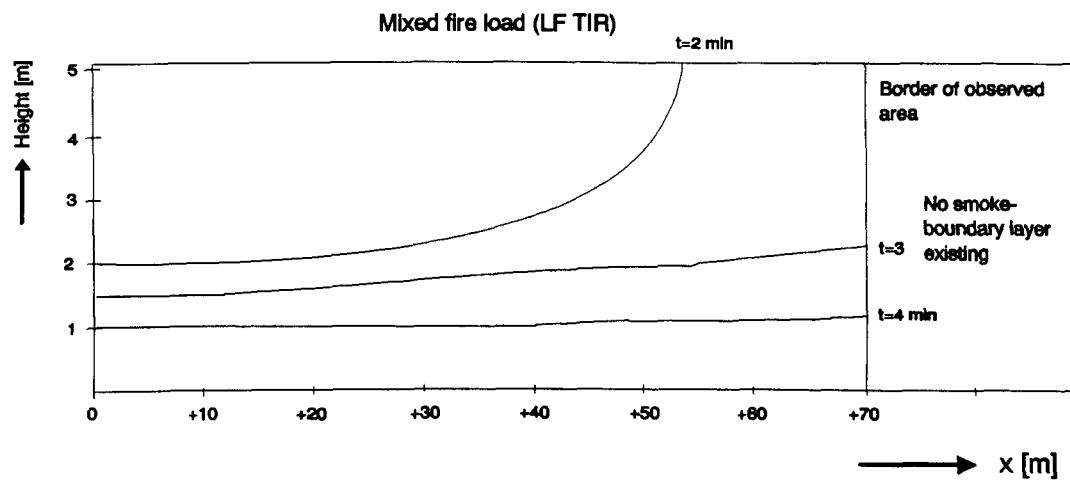


Abbildung 6.28: Mischbrandlast (LF TIR): Lage der mit der stationären Videokamera beobachteten Rauchgasgrenzschicht hinter der Brandlast

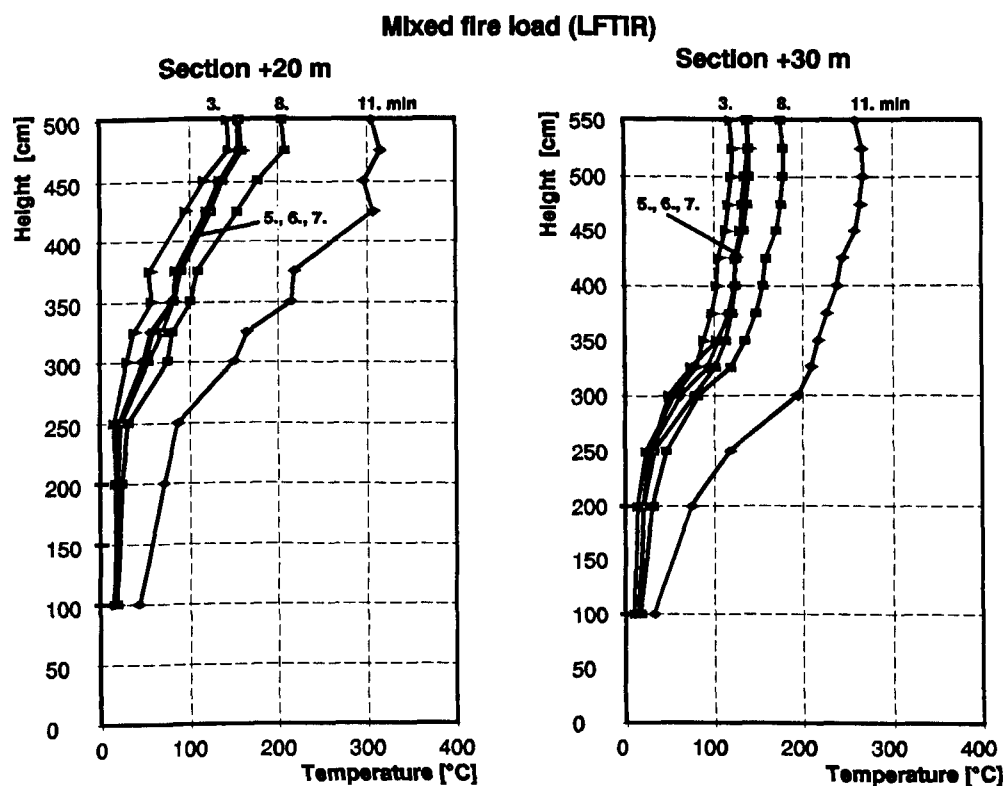


Abbildung 6.29: Mischbrandlast (LF TIR): Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte +20 m und +30 m zu ausgewählten Zeitpunkten

6.3.4 Gaskonzentration in den Schichten

6.3.4.1 Kohlendioxid-Konzentration

Die berechneten CO₂-Konzentrationen in der Heißgasschicht werden bei diesem Versuch mit Meßwerten der Querschnitte ± 20 und ± 30 Meter verglichen. Der Verlauf der Kurven hat bei diesen vier Querschnitten eine ähnliche Charakteristik, wobei die absoluten Werte der berechneten Konzentrationen deutlich über den Meßwerten liegen. Weiterhin ist der zeitliche Verlauf der berechneten Werte in den vier Querschnitten, sowie deren absoluter Wert nahezu gleich (Abweichung zwischen -30 und +20 m: 0.56 Vol.-%). Bemerkenswert ist die Höhe der gemessenen Konzentrationen: Hier werden zwischen der 10. und 20. Minute im Bereich vor der Brandlast höhere CO₂-Konzentrationen als hinter der Brandlast gemessen, obwohl der Versuch mit leichter Zwangsluftströmung vom Portal her gefahren wurde.

Für den CO₂-Gehalt in der Kaltgasschicht werden vom Programm absolute Werte bis maximal 3.3 Vol.-% in der 75. Minute berechnet. Für die hier betrachteten Querschnitte (± 20 , ± 30 m) ergibt sich eine maximale Konzentration von 3.1 Vol.-% CO₂ in der Kaltgasschicht. Der Verlauf der Simulationskurven ist einander ebenfalls ähnlich. Bei den Meßwerten liegen die maximalen Konzentrationen vor der Brandlast bei rd. 0.5 – 0.6 Vol.-%, hinter der Brandlast werden 1.4 – 1.6 Vol.-% erreicht.

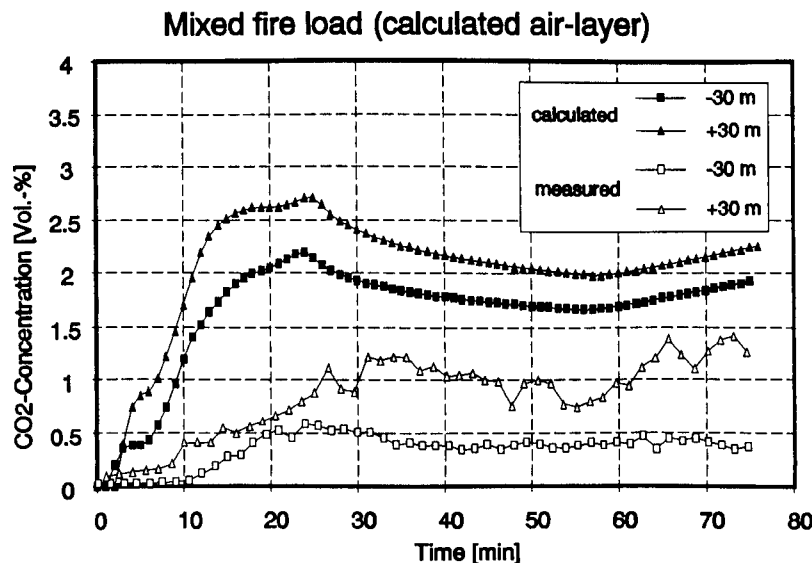


Abbildung 6.30: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene CO₂-Konzentration der Kaltgasschicht in den Querschnitten ± 30 m

In Abb. 6.30 sind die berechneten und gemessenen CO₂-Konzentration der Kaltgasschicht in den Querschnitten ± 30 m dargestellt. Hinter der Brandlast wurden im Betrachtungszeitraum höhere CO₂-Konzentrationen gemessen als vor der Brandlast. Der umgekehrte Fall, der sich in der Heißgasschicht ereignete, tritt hier nicht auf.

6.3.4.2 Kohlenmonoxid-Konzentration

Sowohl für die Heißgas- wie für die Kaltgasschicht wurde mit dem Simulationsmodell keine Bildung von Kohlenmonoxid festgestellt. Die Meßwerte aus den Querschnitten +20 und +30 m hinter der Brandlast, sowie Querschnitt -20 m vor der Brandlast sind in Abb. 6.31 für die Heißgasschicht, und für die Kaltgasschicht in Abb. 6.32 zusammengestellt. Die Meßwerte der Heißgasschicht überschreiten innerhalb der ersten zehn Minuten den Grenzwert von 0.05 Vol.-% (entsprechend 500 ppm) und erreichen einen Maximalwert von rd. 0.27 Vol.-%.

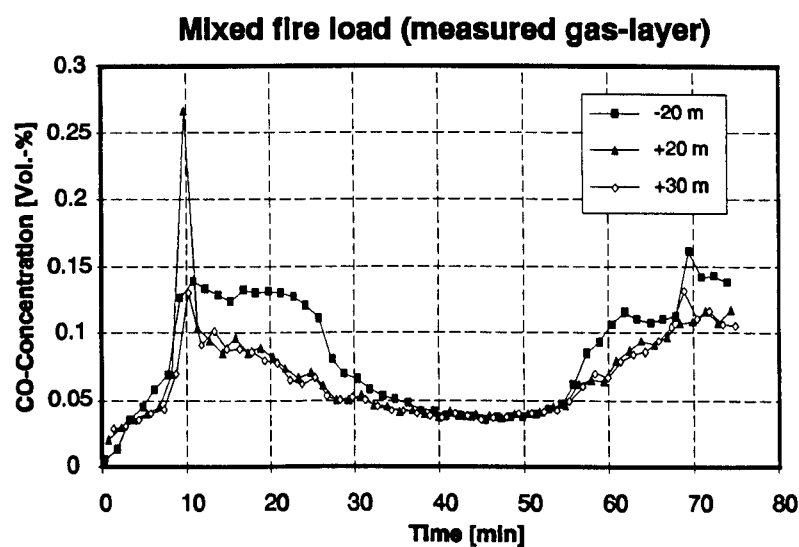


Abbildung 6.31: Mischbrandlast (LF TIR): Gemessene CO-Konzentrationen der Heißgasschicht

Die Werte der Kaltgasschicht überschreiten zu keiner Zeit die 500 ppm-Grenze, so daß die Gefahr einer Kohlenmonoxid Vergiftung gering ist.

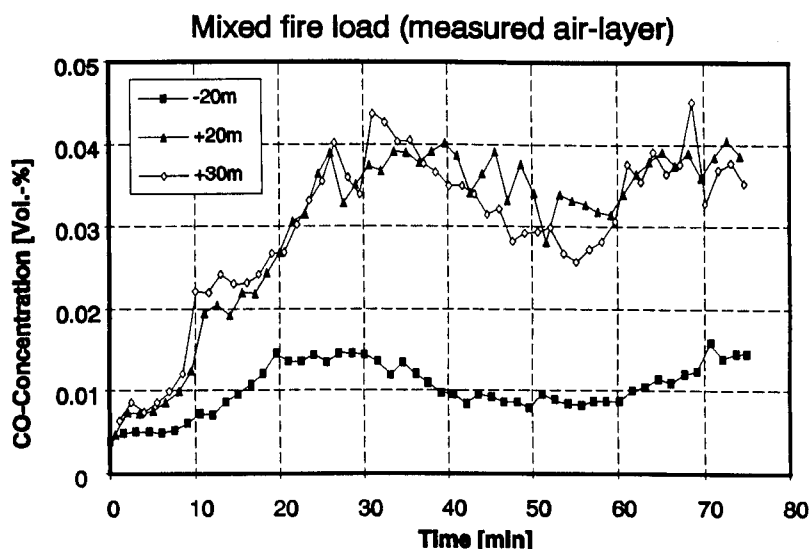


Abbildung 6.32: Mischbrandlast (LF TIR): Gemessene CO-Konzentrationen der Kaltgasschicht

6.3.5 Extinktionskoeffizient

Die berechneten Werte für den Extinktionskoeffizienten k in der Heißgasschicht nehmen Werte zwischen 4 und 8 m^{-1} an. In unmittelbarer Nähe des Brandherdes wird der kleinste Wert berechnet, der mit wachsender Entfernung zum Brandherd stetig zunimmt. Für die Querschnitte, die auf der dem Portal zugewandten Seite liegen, werden etwas größere Werte berechnet, als für die gegenüber liegenden Querschnitte. In der Kaltgasschicht sieht die Verteilung folgendermaßen aus: Mit dem Extinktionskoeffizienten des Brandraumes als Mittelwert ($k = 3.2 \text{ m}^{-1}$) ordnen sich die Werte für die benachbarten Querschnitte symmetrisch passend dazu an. Für den Bereich hinter der Brandlast werden die höheren Koeffizienten berechnet. In der Entfernung von 30 m hinter der Brandlast wird um die 25. Minute der maximale Wert von $k = 3.5 \text{ m}^{-1}$ berechnet, im Querschnitt -30 m sind es ca. $k = 2.9 \text{ m}^{-1}$. Die geringsten Werte werden in den Querschnitten $\pm 45 \text{ m}$ durch die Simulation vorhergesagt. Für den Querschnitt -45 m wird $k = 1.2 \text{ m}^{-1}$, bei $+45 \text{ m}$ $k = 1.8 \text{ m}^{-1}$ berechnet. In beiden Schichten wird das jeweilige Maximum zwischen der 23. und 25. Minute erreicht. Die zur Verfügung stehenden Meßwerten wurden im Querschnitt $+300 \text{ m}$ gemessen (Abb. 6.33).

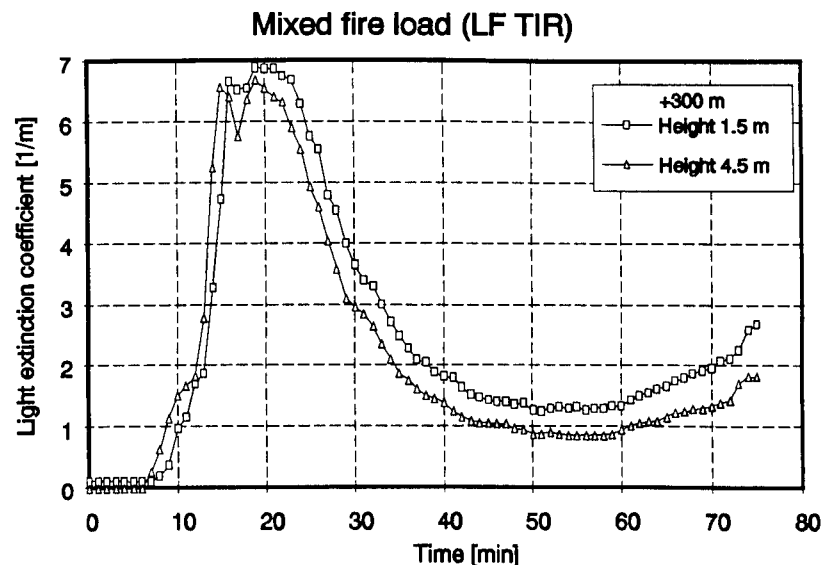


Abbildung 6.33: Mischbrandlast (LF TIR): Gemessener zeitabhängiger Verlauf des Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m

Zwischen den beiden Meßwerten für die Kalt- und für die Heißgasschicht ist keine große Differenz ersichtlich. Vermutlich sind durch Verwirbelungen hinter der Brandlast die beiden Schichten vermischt worden. Der Maximalwert von $k = 6.9 \text{ m}^{-1}$ wird zwischen der 15. und 22. Minute an der Meßstelle in 1.5 m Höhe erreicht. Der Anstieg des Extinktionskoeffizienten beginnt nach rd. 7 Minuten.

In ihrer Größenordnung stimmen die berechneten Koeffizienten der Heißgasschicht mit den gemessenen überein, der Zeitpunkt ihres Anstieges wird aber nicht korrekt berechnet. Die zeitliche Differenz liegt möglicherweise an der unterschiedlichen Entfernung zum Brandherd. Für den näher am Brandherd gelegenen Bereich stehen keine Meßwerte zur Verfügung, weil dort wegen der erwarteten hohen Temperaturen keine Meßstationen installiert wurden.

6.4 Zusammenfassung

Hier sollen die Ergebnisse der Berechnungen mit der ersten vorgestellten Segmentierung kurz dargestellt werden. Zu beachten ist bei dieser Segmentierung, daß im Programm davon ausgegangen wird, daß die Querschnitte -55 und $+55$ m mit der freien Umgebung in Kontakt stehen und deshalb mit Frischluft versorgt werden. Diese Vereinfachung ist bei der individuellen Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Große Differenzen bestehen noch bei den Temperaturen im Brandraum, so daß dieser Bereich nicht in die Zusammenfassung aufgenommen wurde.

Für die drei Versuche gilt, daß keine Kohlenmonoxid-Konzentrationen berechnet wurden, was mit den Meßwerten nicht im Einklang steht.

6.4.1 Holzkrippenbrand Nr. 3

Die Meßergebnisse der Temperaturen in der Heißgasschicht vor der Brandlast werden in guter Näherung berechnet. Hinter der Brandlast in den Querschnitten +10 bis +45 m liegen die berechneten Werte je ca. 100 Kelvin unterhalb der gemessenen Temperaturen.

Für die Kaltgasschicht ergibt sich vor und hinter der Brandlast eine relativ gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen.

Die bis zur 18. Minute beobachtete Heißgasgrenzschicht ist im Querschnitt –180 m bis auf 2 m über den Tunnelboden abgesunken. Aus den Temperaturmessungen im Querschnitt –20 m ergibt sich für die Heißgasgrenzschicht eine Höhe von ca. 3.3 m über der Tunnelsohle. Die berechnete Höhe der Heißgasgrenzschicht sinkt nicht unter 4 m.

Es werden zu hohe CO_2 -Konzentrationen für die Heiß- und die Kaltgasschicht berechnet, während die CO-Konzentrationen mit den zugrundegelegten Eingabedaten unzureichend berücksichtigt werden.

Bei den gemessenen Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m kann zwar zwischen den beiden Gasschichten unterschieden werden, doch die berechneten Werte im Querschnitt +30 m sind dreimal kleiner als die gemessenen. Hier ist aber zu beachten, daß zwischen dem Ort des berechneten Wertes und Meßort eine Distanz von rd. 270 m liegt.

6.4.2 Holzkrippenbrand Nr. 4

Vor der Brandlast stellen sich für die Heißgastemperaturen große Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten ein. Die Heißgastemperaturen hinter der Brandlast sowie die Kaltgastemperaturen vor und hinter der Brandlast zeigen eine gute Näherung.

Auch bei den in diesem Versuch herrschenden Belüftungsverhältnissen hat das Programm eine Heißgasgrenzschicht berechnet. Eine solche Schichtung von Heiß- und Kaltgas ist während der Versuche nicht beobachtet worden. Ein Schichtenmodell muß aber mit solchen Schichten arbeiten, wobei die berechneten Temperaturen diese Vorgehensweise rechtfertigen könnten.

Für die CO_2 -Konzentrationen wurden sowohl in der Heiß- als auch in der Kaltgasschicht wie im Holzkrippenbrand Nr.3 zu hohe Werte berechnet. Allerdings stimmt im Holzkrippenbrand Nr.4 die Charakteristik der berechneten Konzentrationen mit den gemessenen gut überein. Wird für den berechneten Extinktionskoeffizienten der Wert $k = 0.5 \text{ m}^{-1}$, der für die Kaltgasschicht ermittelt wurde, zugrundegelegt, und mit dem maximalen Meßwert $k = 0.2 \text{ m}^{-1}$ aus Querschnitt +300 m verglichen, so ergibt sich eine gute Näherung.

6.4.3 Mischbrandlast (LF TIR)

Die Heißgastemperaturen vor und hinter der Brandlast werden in guter Näherung zu den Meßwerten berechnet. Bei den Kaltgastemperaturen ist die Übereinstimmung

zwischen Meßwert und berechnetem Wert nicht so gut wie bei den Heißgasen. So liegen die berechneten Werte der Kaltgasschicht vor der Brandlast bis zu 100 K über den Meßwerten, wohingegen im Querschnitt +10 m die berechneten Temperaturen erheblich unter den gemessenen liegen.

Die berechnete Dicke der Heißgasgrenzschicht im Bereich vor der Brandlast ist geringer als die aus den Versuchsbeobachtungen rekonstruierte. Hinter der Brandlast kann aus der Versuchsbeobachtung keine Grenzschicht festgestellt werden, wohingegen vom Programm eine Grenzschicht berechnet wird.

Die berechneten CO₂-Konzentrationen liegen wie bei den beiden vorhergehenden Versuchen über den gemessenen Werten, wobei der Kurvenverlauf von berechneten und gemessenen Werten Ähnlichkeiten aufweist.

Die experimentell ermittelten Extinktionskoeffizienten sind für die Heiß- und Kaltgasschicht annähernd gleich. Aus der Berechnung ergibt sich für die Heißgasschicht, daß der Maximalwert etwas über dem Meßwert, der Maximalwert der Kaltgasschicht unter dem Meßwert liegt.

7 Variation der Berechnungsgeometrie am Beispiel der Mischbrandlast

Für die Berechnungen mit dem Rechenprogramm FIGARO ist im Eingabedatensatz eine Unterteilung (Segmentierung) des Tunnels in verschiedene Segmente notwendig. Hierbei sind unterschiedliche Anordnungen denkbar, von denen ein Teil in der Tab. 7.1 zusammengestellt ist. Bei den fett gedruckten Zeilen handelt es sich um die Segmentierungen, mit denen in diesem Bericht die Berechnungen durchgeführt wurden.

Segmen- tierung	Zahl der Segmente	Bereich	Längen der Segmente	Geodätische Höhe berücksichtigt
1.	9	-55 bis +55 m	10, 20	nein
2.	9	-15 bis +475 m	10, 20, 50, 350	nein
3.	9	-55 bis +55 m	10, 20	ja
4.	9	-350 bis 550 m	100	nein
5.	9	-350 bis 550 m	100	ja
6.	15	-350 bis 1050 m	100	nein
7.	15	-350 bis 1050 m	100	ja

Tabelle 7.1: Verschiedene Segmentierungsmöglichkeiten

Die Berechnungen im Kapitel 6 sind auf der Grundlage der 1. Segmentierung durchgeführt worden. In diesem Kapitel sollen Berechnungen mit zwei weiteren Segmentierungen durchgeführt werden. Dazu wird in der ersten Variationsrechnung die zweite Segmentierung ausgewählt, mit der der Bereich über den Querschnitt +55 m hinaus in die Auswertung einbezogen wird.

Mit der zweiten Variationsrechnung soll der Einfluß der geodätischen Höhenlage der Tunnelsohle untersucht werden. Dazu wird die 3. Segmentierung mit der 1. Segmentierung verglichen.

7.1 1. Variation

Für die erste Variante der Berechnung wird eine neue Geometrievorgabe gemacht, so daß der Bereich von Querschnitt +55 m bis Querschnitt +475 m zu den bereits berechneten Querschnitten -10 bis +45 m hinzukommt.

Auf diese Weise ist es zum einen möglich, den doppelt berechneten Bereich von -10 bis +45 m daraufhin zu untersuchen, welche Auswirkung die Wahl der geometrischen Eingabedaten auf die Berechnung hat. Zum anderen kann die Ausbreitung der Heiß- und Kaltgasschicht für weiter vom Brandherd entfernte Bereiche berechnet werden. Die Werte für die Geometrievorgabe sind in Tab. 7.2 zusammengestellt und in Abb. 7.1 dargestellt.

Raum	Lage x [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Länge [m]	Fläche [m ²]
1	± 0	6.30	5.10	10	32.1
2	+ 10	6.40	5.30	10	33.9
3	+ 20	6.50	5.20	10	33.8
4	+ 30	6.50	5.70	10	37.1
5	+ 45	6.75	5.35	20	36.1
6	+ 65	6.80	6.80	20	33.3
7	+ 100	7.00	5.30	50	37.1
8	+ 300	6.40	5.10	350	32.6
9	- 10	6.35	5.00	10	31.8

Tabelle 7.2: Abmessungen und Lage der Räume

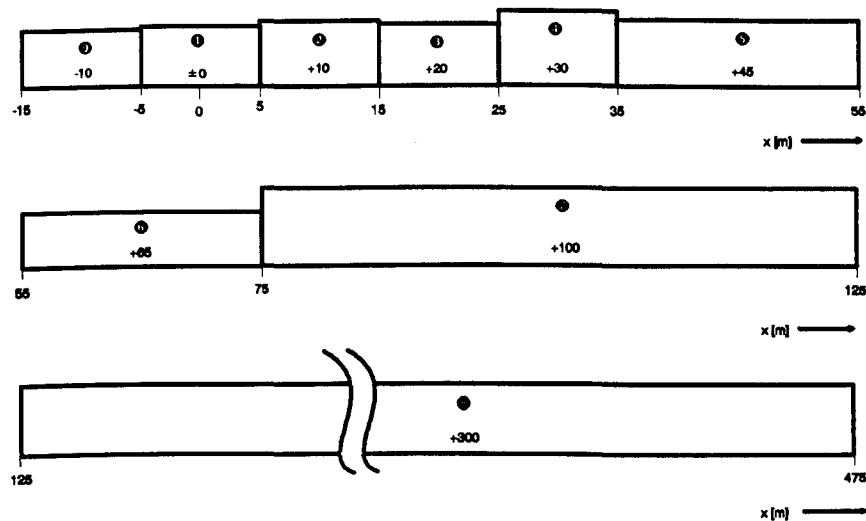


Abbildung 7.1: Lage der Räume bei der 2. Segmentierung

7.1.1 Abbrandrate

Die Vorgabe der Abbrandrate hat sich gegenüber Abschnitt 6.3.1 nicht geändert.

7.1.2 Temperaturen

Die Temperaturen der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m werden in beiden Varianten annähernd identisch berechnet und liegen oberhalb der gemessenen Temperatur. Der maximale Temperaturmeßwert von ca. 310 °C wird in der 15. Minute gemessen (s. Abb. 7.2).

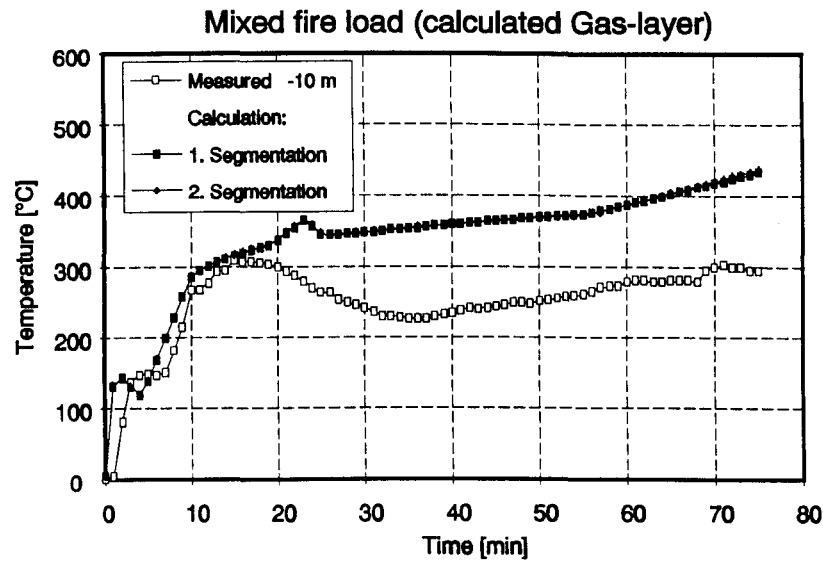


Abbildung 7.2: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m

In den Querschnitten von +10 bis +45 m weisen die neu berechneten Werte eine Abweichung bis zu maximal -10 % zu den im Abschnitt 6.3.2 berechneten Werten auf. Die Abweichung vergrößert sich mit wachsender Entfernung zur Brandlast. Dennoch haben die Meßwerte, wie in Abb. 7.3 gezeigt, eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten.

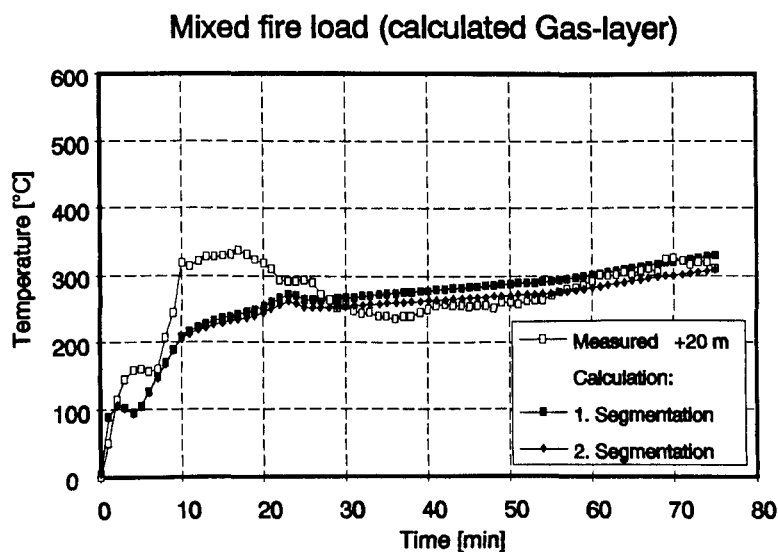


Abbildung 7.3: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Heißgasschicht im Querschnitt +20 m

Für die Querschnitte +65 und +100 m werden die Temperaturen in der Heißgasschicht unzutreffend berechnet. Die gemessenen Temperaturwerte betragen im Quer-

schnitt +65 m ca. 180 °C und bei +100 m rd. 100 °C, während für beide Querschnitte zwischen 10 und 20 °C berechnet werden.

In der Kaltgasschicht wird im Querschnitt –10 m ein bis zu 50 % geringerer Temperaturwert (max. 40 °C) als im ersten Berechnungslauf berechnet. Die Abweichung vergrößert sich mit der nach Berechnungsbeginn verstrichenen Zeit. Die Annäherung zu den gemessenen Kaltgastemperaturen (max. 10 °C) wird dadurch verbessert.

Im Querschnitt –15 m wird gemäß Eingabedatensatz das Portal des Tunnels simuliert, über das die Frischluft dem Tunnel zugeführt wird. Die Frischluftzufuhr macht sich bei den Temperaturen in der Kaltgasschicht bemerkbar, nicht aber bei den Temperaturen in der Heißgasschicht.

Im Querschnitt +30 m ist die Abweichung zur ersten Berechnung sehr gering (Abb. 7.4). In beiden Berechnungen werden in der 60. Minute rd. 35 °C erreicht. Die zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Temperaturen liegen mit ca. 55 °C gut 20 Kelvin höher.

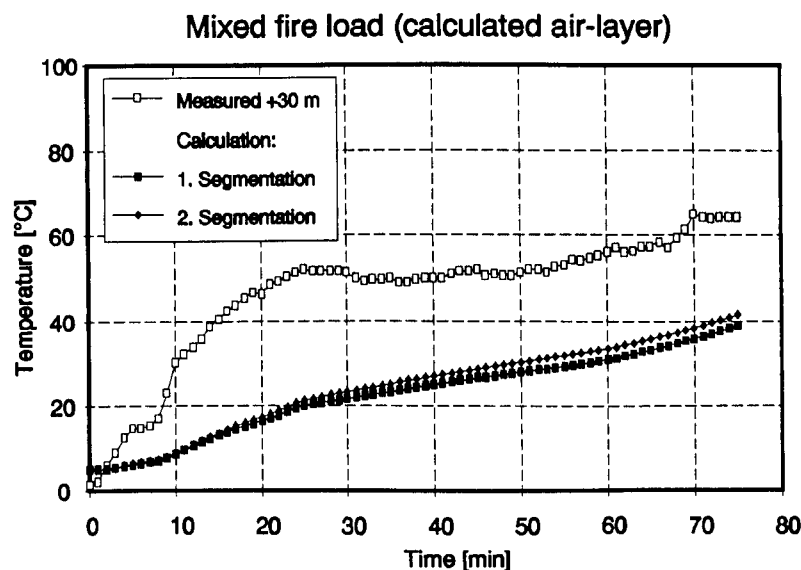


Abbildung 7.4: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m

In den Querschnitten +65 und +100 m ist die Annäherung der berechneten an die gemessenen Temperaturwerte für die Kaltgasschicht besser als für die Heißgasschicht. Die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen wird ab der 40. Minute immer geringer (vergl. Abb. 7.5) und beträgt nur rd. 10 Kelvin. Ein ausgeprägtes Maximum von rd. 55 °C, welches sich zur 19. Minute im gemessenen Temperaturverlauf einstellt, wird nicht erreicht.

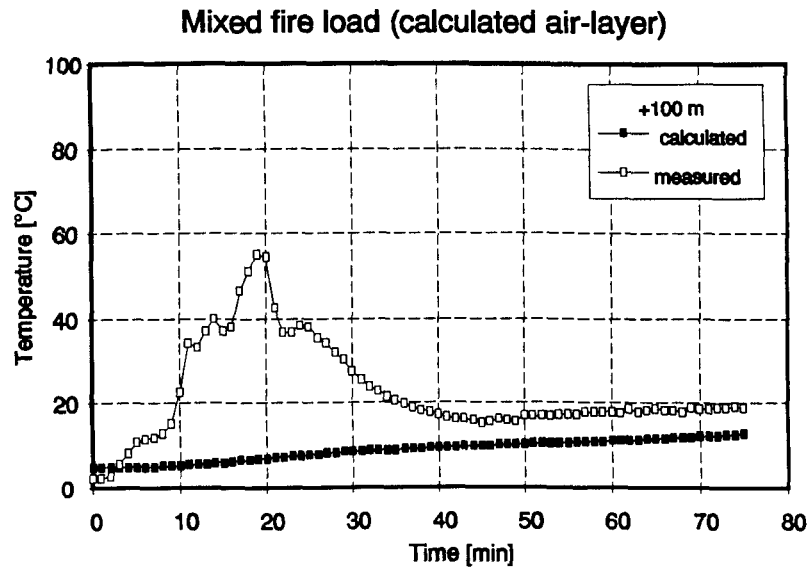


Abbildung 7.5: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene Temperaturen in der Kaltgasschicht im Querschnitt +100 m

7.1.3 Konzentration der Verbrennungsgase

7.1.3.1 Kohlendioxid-Konzentration

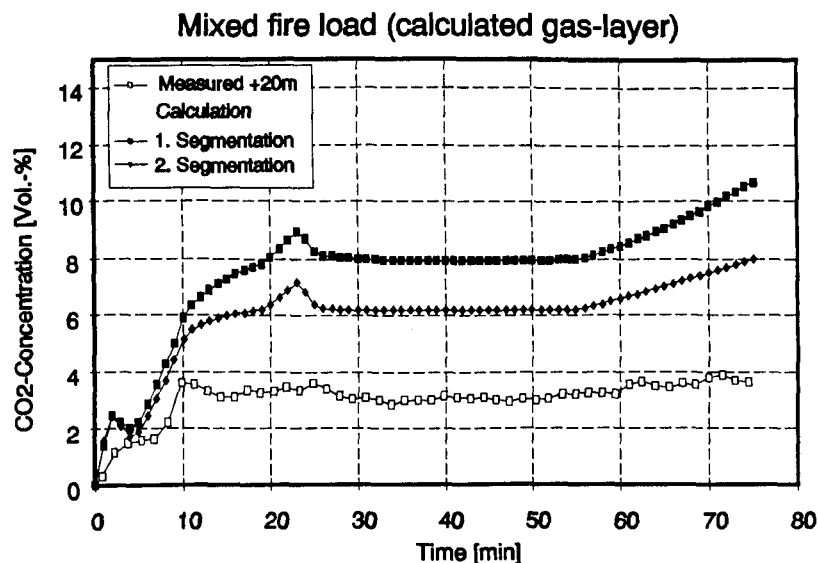


Abbildung 7.6: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene CO₂-Konzentration in der Heißgasschicht, Querschnitt +20 m

Ähnlich wie bei der 1. Segmentierung werden zu hohe CO₂-Konzentrationen in der Heißgasschicht berechnet. Während der stationären Brandphase, die gemäß Abbrandrate zwischen 25. und 55. Minute liegt (vergl. Abb. 6.21), wird mit der 2. Seg-

mentierung im Querschnitt +20 m eine CO_2 -Konzentration von rd. 6.2 Vol.-% berechnet. Demgegenüber steht ein gemessener Wert von 3.1 Vol.-%. Wie Abb. 7.6 zeigt, geht aus der Berechnung mit der ersten Segmentierung ein Wert von ca. 8.0 Vol.-% während der stationären Brandphase hervor. Im Vergleich zu Querschnitt +20 m sind die Berechnungsergebnisse aus Querschnitt +30 m nahezu identisch. Die gemessene CO_2 -Konzentration in der Heißgasschicht beträgt während der stationären Brandphase ca. 2.9 Vol.-%.

Im Querschnitt +100 m zeigen die berechneten CO_2 -Konzentrationen der Heißgasschicht sowohl im absoluten Betrag als auch im zeitlichen Verlauf einen abweichenden Verlauf zu denen im Querschnitt +20 m (s. Abb. 7.7). Die für Querschnitt +20 m berechnete konstante CO_2 -Konzentration während der stationären Brandphase tritt im Querschnitt +100 m nicht mehr auf. Die maximale CO_2 -Konzentration von 4.9 Vol.-% wird in der 23. Minute erreicht, danach sinkt die berechnete Konzentration allmählich auf ca. 4.0 Vol.-% ab. Gemessen wurde zwischen der 25. und 55. Minute eine CO_2 -Konzentration von 2.0 Vol.-%.

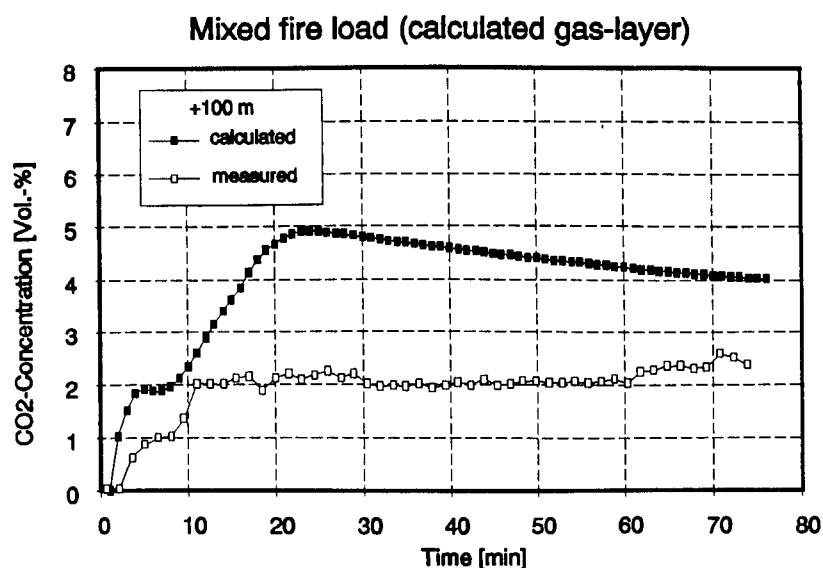


Abbildung 7.7: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene CO_2 -Konzentration in der Heißgasschicht, Querschnitt +100 m

In der Kaltgasschicht wird für die 2. Segmentierung in den Querschnitten +20 und +30 m eine höhere CO_2 -Konzentration als für die 1. Segmentierung berechnet. Die stationäre Brandphase, die gemäß Abbrandrate zwischen der 25. und 55. Minute liegt, wird bei der CO_2 -Konzentration beider Segmentierungen in der Kaltgasschicht mit einer zeitlichen Verzögerung von 5 Minuten erkennbar und liegt zwischen der 30. und 65. Minute (Abb. 7.8).

Im Querschnitt +20 m wird während der stationären Brandphase des Berechnungslaufes mit der 2. Segmentierung eine gemittelte Konzentration von 3.2 Vol.-% berechnet, die um 0.6 Vol.-% höher liegt, als bei der 1. Segmentierung.

Noch gravierender stellt sich die unterschiedliche CO_2 -Konzentration im Querschnitt +30 m dar. Für die 2. Segmentierung wird ein mittlerer Wert von 3.9 Vol.-%

berechnet, der um 1.6 Vol.-% über dem der ersten Segmentierung liegt.

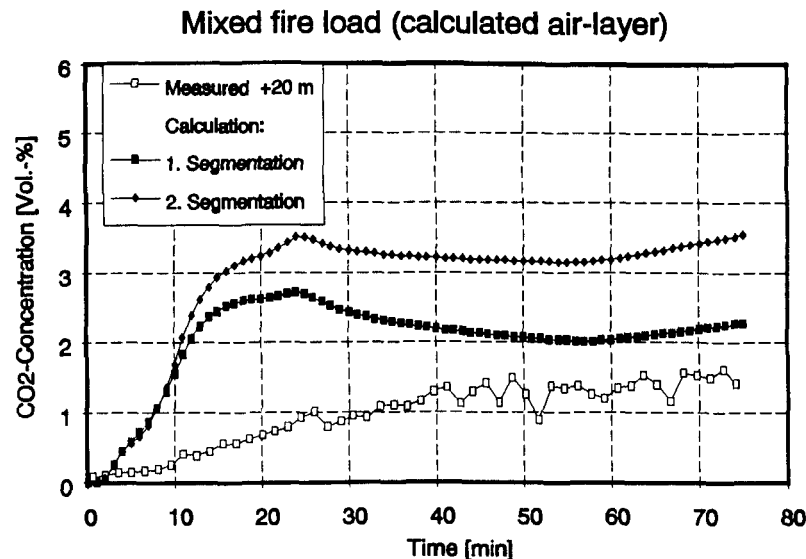


Abbildung 7.8: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene CO_2 -Konzentration in der Kaltgasschicht, Querschnitt +20 m

Es ist möglich, daß hier der Einfluß der Lage des Außenraumes deutlich wird. Bei der 1. Segmentierung endet der Außenraum im Querschnitt +55 m, während in der 2. Segmentierung die Außenumgebung erst im Querschnitt +475 m erreicht wird. Im Modell steht der Außenraum mit Umgebungsluft außerhalb des Tunnels in Verbindung. Diese Luft wird durch eine sehr geringe CO_2 -Konzentration gekennzeichnet. Durch die Einmischung der Umgebungsluft in die Kaltgasschicht wird die CO_2 -Konzentration der Kaltgasschicht gesenkt.

Wird die Entwicklung der CO_2 -Konzentration vom Querschnitt +20 m nach Querschnitt +30 m für beide Segmentierungen betrachtet, so ist bei der 1. Segmentierung ein Rückgang der CO_2 -Konzentration um 0.3 Vol.-% gegenüber einer Erhöhung um 0.7 Vol.-% in der 2. Segmentierung festzustellen. Im Vergleich dazu sinkt der Meßwert um 0.2 Vol.-% auf eine CO_2 -Konzentration von 1.0 Vol.-% ab.

Weiterhin gestattet die 2. Segmentierung den Vergleich von Meß- und Rechenwert im Querschnitt +100 m, der in Abb. 7.9 dargestellt ist. Der stationäre Verlauf des CO_2 -Meßwertes wird hier schon ab der 20. Minute erreicht (1.3 Vol.-%). Aus der Berechnung ergibt sich kein ausgeprägter stationärer Verlauf. Wird der zwischen der 30. und 70. Minute gemittelte Rechenwert von 2.4 Vol.-% mit dem aus Querschnitt +30 m verglichen, so ist ein Rückgang der Konzentration um 1.5 Vol.-% festzustellen. Der Meßwert hat sich aber gegenüber Querschnitt +30 m um 0.3 Vol.-% vergrößert.

Der Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Kaltgasschicht im Querschnitt 100 m wird relativ gut vorausberechnet.

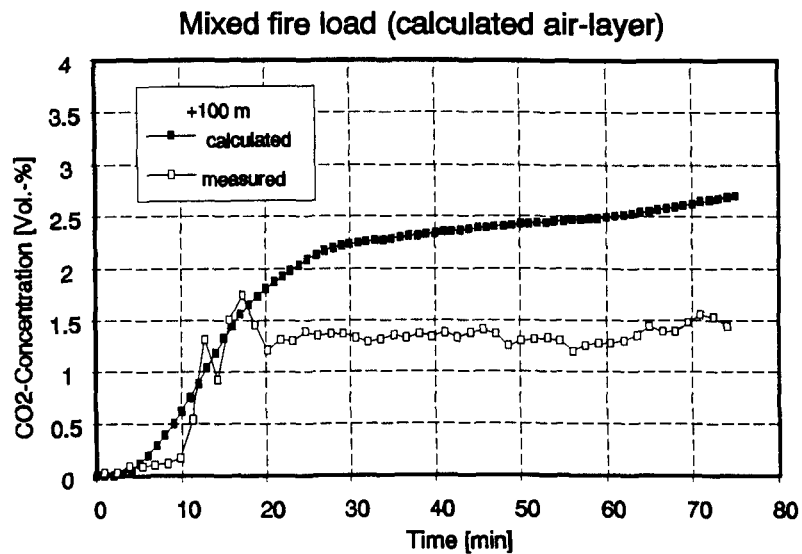


Abbildung 7.9: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene CO₂-Konzentration in der Kaltgasschicht, Querschnitt +100 m

7.1.3.2 Kohlenmonoxid-Konzentration

Wie bei der 1. Segmentierung wird sowohl in der Heiß- als auch in der Kaltgasschicht eine CO-Konzentration von 0.0 Vol.-% berechnet.

7.1.4 Extinktionskoeffizient

In Abb. 6.33 auf Seite 78 wurden die gemessenen Extinktionskoeffizienten in 1.5 und 4.5 m Höhe dargestellt. Mit der 2. Segmentierung besteht die Möglichkeit, diese Meßwerte mit Werten aus der Berechnung zu vergleichen.

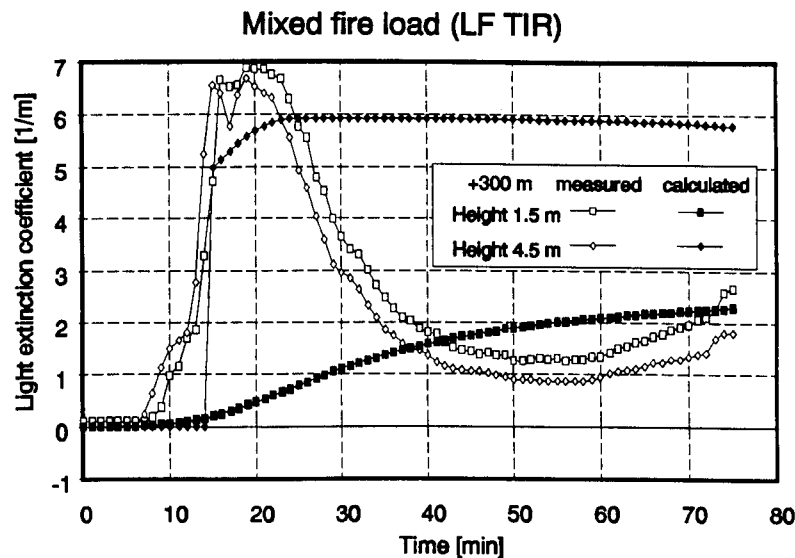


Abbildung 7.10: Mischbrandlast (LF TIR): Berechnete und gemessene Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m

Aus Abb. 7.10 ist erkennbar, daß der für die Höhe von 4.5 m im Querschnitt +300 m berechnete Wert (entsprechend der Heißgasschicht) in der Größenordnung gut zu dem gemessenen Wert paßt. Allerdings wird mit der Messung nach dem Maximalwert zur 19. Minute ein Abfall des Extinktionskoeffizienten k registriert, während der Rechenwert eher einen konstanten Wert liefert.

Eine klare Trennung in Heiß- und Kaltgasschicht, wie sie die Berechnung für den Extinktionskoeffizienten vorsieht, wird durch die Messung nicht bestätigt. Vielmehr liegt hier eine fast homogene Rauchschicht über den gesamten Querschnitt vor.

7.2 2. Variation

Die 2. Variation der Raumgeometrie (3. Segmentierung) besteht aus der gleichen Raumanordnung, wie die 1. Segmentierung, mit dem Unterschied, daß der geodätische Höhenverlauf des Tunnelbodenniveaus in die Programmeingabe eingearbeitet wurde.

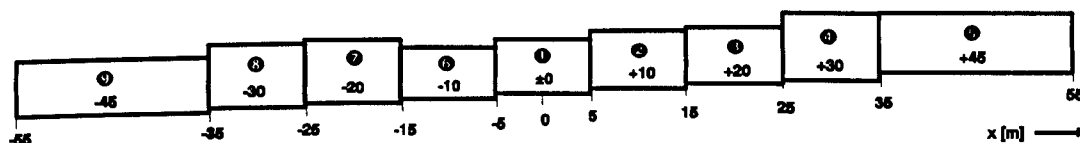


Abbildung 7.11: Lage der Räume bei der 3. Segmentierung

7.2.1 Temperaturen

Zum Vergleich der aus der 1. und 3. Segmentierung berechneten Temperaturen wurden die Temperaturwerte [°C] über die Gleichung

$$\Delta T_{3,1} = \frac{T_3 - T_1}{T_1} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

miteinander ins Verhältnis gesetzt. Daraus entstehen z.B. im Querschnitt -30 m Abweichungen über 20 % in der zweiten Minute nach der Zündung. Zur Relativierung der Dimensionen sind hier die absoluten Meßwerte der Temperaturen $T_1 = 67^\circ\text{C}$ und $T_3 = 52^\circ\text{C}$ genannt (s. auch Abb. 7.14).

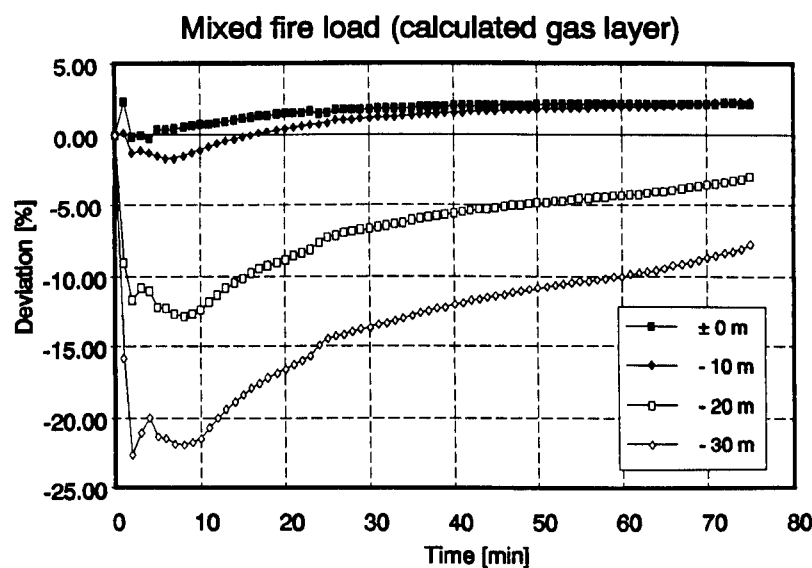


Abbildung 7.12: Abweichung $\Delta T_{3,1}$ der aus der 1. und 3. Segmentierung berechneten Heißgastemperaturen im Bereich vor dem Brandherd

Aus der Entwicklung der Kurven in Abb. 7.12 geht hervor, daß die Abweichung mit der Entfernung zum Brandherd wächst. Hier ist zu beachten, daß sich mit zunehmender Versuchsdauer die Abweichung verringert.

Für den Bereich hinter der Brandlast ergeben sich nicht so große Abweichungen wie im Bereich vor der Brandlast, wobei die Abweichung aber ebenfalls mit der Entfernung zum Brandherd anwachsen. Die Abweichungen werden im Gegensatz zum portalseitigen Bereich mit der Zeit größer (max. Abweichung -12 % zum Zeitpunkt $t = 75$ min im Querschnitt +45 m).

Beispielhaft sind in Abb. 7.13 die Heißgastemperaturen aus Querschnitt +45 m sowie die gemäß Gl.(7.1) berechnete Abweichung dargestellt. Die Anfangs gute Übereinstimmung wandelt sich bis zur 75. Minute in eine Differenz von rd. 20 Kelvin um, welche der o.g. Abweichung von -12 % entspricht.

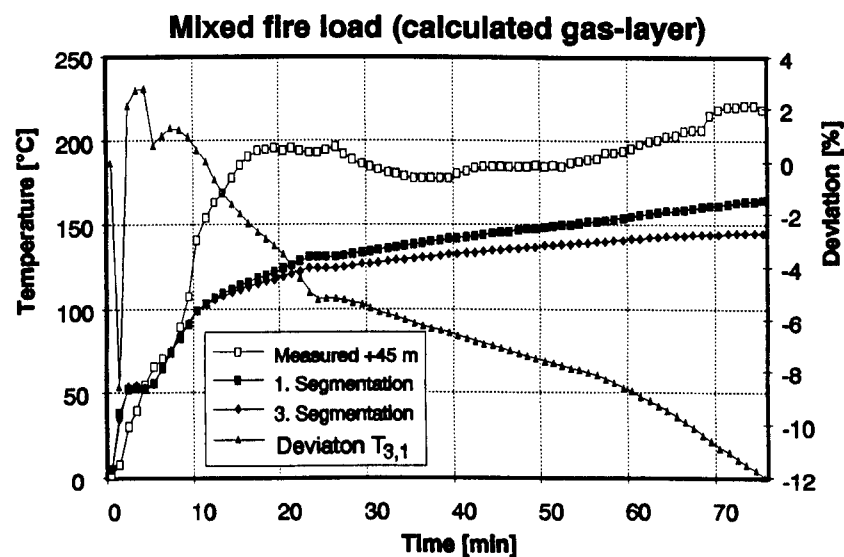


Abbildung 7.13: Berechnete Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +45 m

Verglichen mit den im Querschnitt +45 m gemessenen Temperaturen der Heißgas-schicht werden mit der 1. Segmentierung geringfügig bessere Ergebnisse erzielt. Die berechneten Temperaturen beider Segmentierungen sind gegenüber den gemessenen Temperaturen zu gering. Vom Querschnitt -45 m bis zum Querschnitt +20 m liegen die berechneten Temperaturen über den gemessenen (mit Ausnahme des Brandraumes). Die Abb. 7.14 zeigt die Temperaturen im Querschnitt -30 m, in dem die 3. Segmentierung die bessere Näherung an die gemessenen Temperaturen berechnet.

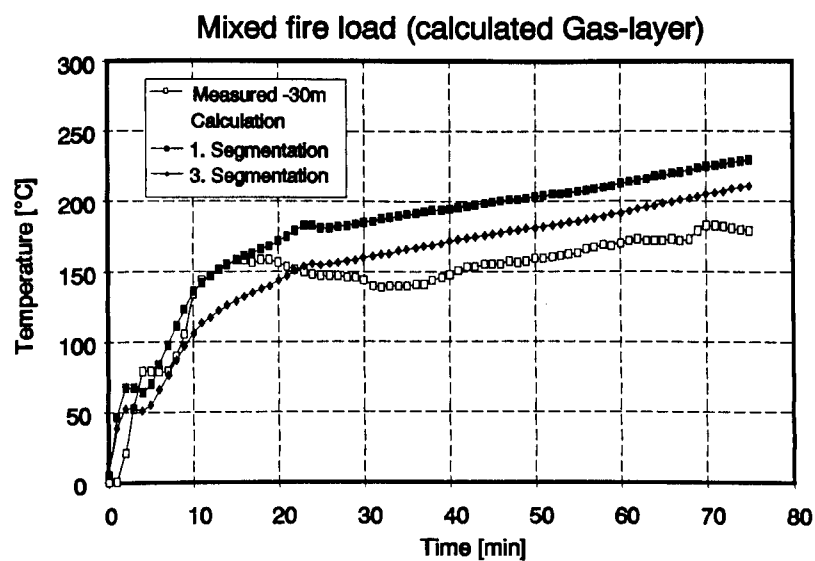


Abbildung 7.14: Berechnete Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt -30 m

Durch die 3. Segmentierung wird bei der Beschreibung der Tunnelgeometrie ein stufenweiser Anstieg des Bodenniveaus eingesetzt. Dadurch ergibt sich insgesamt eine Schräglage des Tunnels, so daß die Heißgase gegenüber der ersten Segmentierung verstärkt in Richtung Schacht strömen müßten. Um in Richtung Portal die gleiche Entfernung zurückzulegen wie bei der ersten Segmentierung, sollten die Heißgase bei der 3. Segmentierung mehr Zeit benötigen. Um die dazu nötige Zeit zu berechnen, wäre die Berücksichtigung des Impulses der Strömung notwendig. Die Impulsgleichung wird in der Regel in Zonenmodellen nicht berücksichtigt.

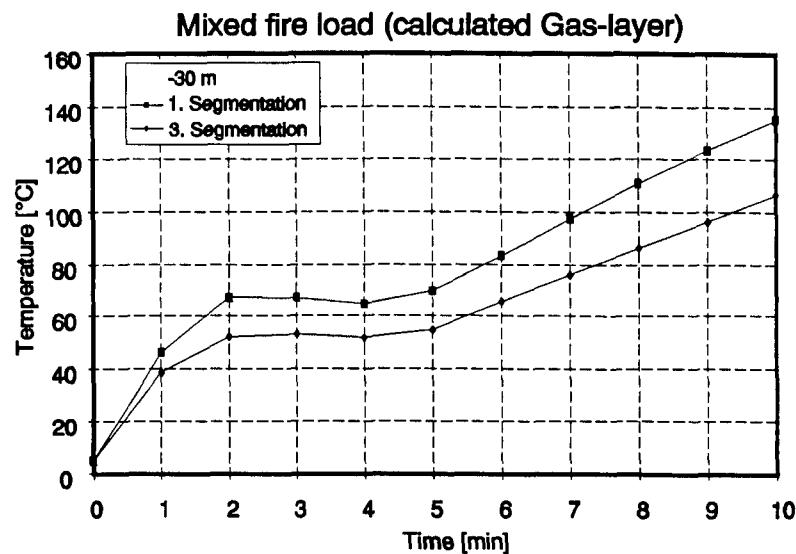


Abbildung 7.15: Vergleich der berechneten Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt –30 m

Die Abb. 7.15 zeigt, daß das relative Minimum bei beiden Segmentierungen in der vierten Minute erreicht wird. Unterschiedlich sind die absoluten Temperaturwerte.

Für die Kaltgasschicht wurden im Bereich vor der Brandlast (–45 bis –10 m) bis zur 75. Minute max. 15 °C gemessen, während die berechneten Temperaturen darüber liegen (vergl. Abb. 6.24). Der Unterschied der Berechnungen für die Kaltgasschicht mit der 1. und 3. Segmentierung ist deutlich geringer als in der Heißgasschicht. Für die Querschnitte von –45 bis +45 m bewegt sich die Abweichung zwischen +8 % und –8 %. Beispielhaft wird die Temperaturentwicklung im Querschnitt +20 m in Abb. 7.16 dargestellt.

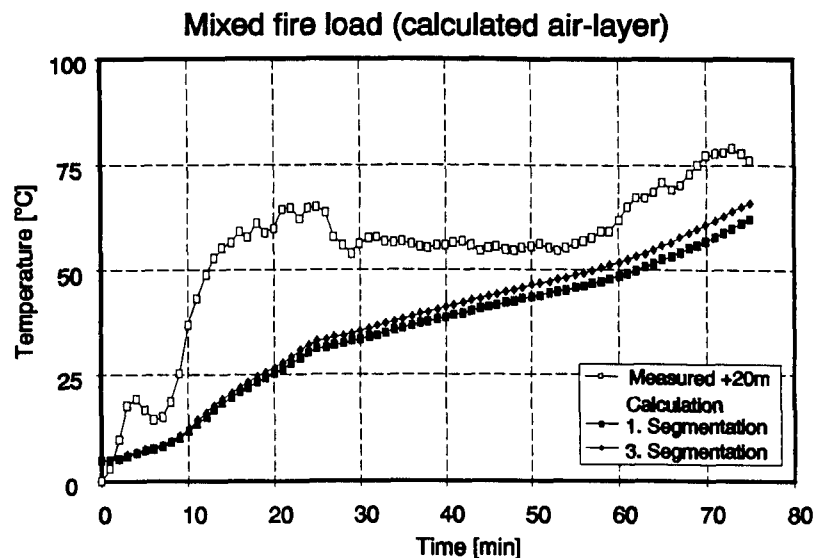


Abbildung 7.16: Vergleich der berechneten Kaltgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +20 m

7.2.2 Heißgasgrenzschicht

Die Höhe der Heißgasgrenzschicht sollte sich nach der Berechnung gemäß der 3. Segmentierung von der 1. Segmentierung insoweit unterscheiden, daß sich im Bereich vor der Brandlast die Heißgasgrenzschicht höher über dem Boden befindet, als bei der ersten Segmentierung. Dieser Fall tritt aber nur im Querschnitt –45 m ein.

Die aus Abb. 7.11 ersichtliche unterschiedliche Höhe der einzelnen Räume bewirkt zwischen den Räumen 6 und 7 eher einen Anstieg der Decken als einen Abfall. Erst zum Übergang zu Raum 9 entsteht durch die unterschiedliche Raumhöhe und Höhenlage des Bodenniveaus ein Absatz, an dem sich die Heißgase aufstauen können.

Für den Bereich –30 bis –10 m liegt die Heißgasgrenzschicht niedriger als bei der ersten Segmentierung bzw. auf der gleichen Höhe über der Sohle wie bei der ersten Segmentierung.

In den Bereich hinter der Brandlast sollte wegen der Steigung des Tunnels vermehrt Rauch ziehen, so daß sich eine dickere Heißgasschicht bildet und die Distanz zwischen Heißgasgrenzschicht und Boden geringer wird. Dies ist nur im Querschnitt +20 m der Fall (siehe Abb. 7.17).

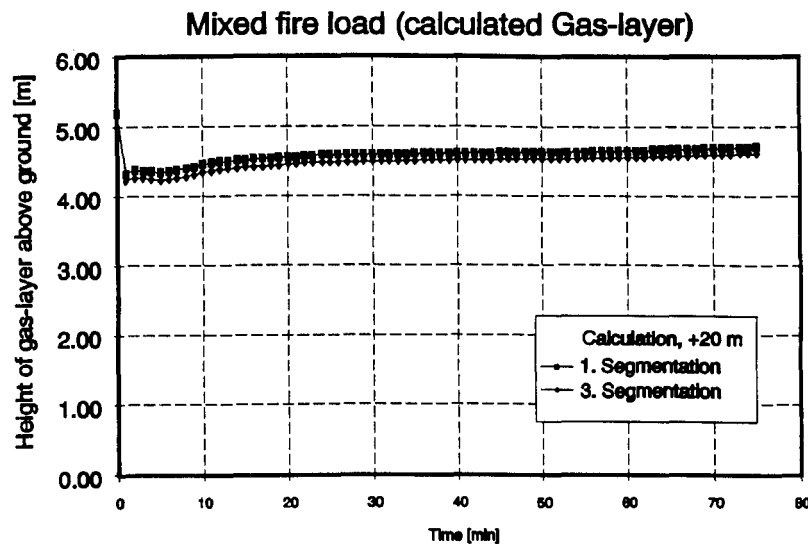


Abbildung 7.17: Vergleich der berechneten Lage der Heißgasgrenzschicht aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +20 m

7.2.3 Konzentration der Verbrennungsgase

7.2.3.1 Kohlendioxid-Konzentration

Bei der 3. Segmentierung wurde für alle im Bereich -55 bis $+55$ m liegenden Querschnitte eine ca. 1.5 Vol.-% höhere CO_2 -Konzentration in der Heißgasschicht als bei der ersten Segmentierung berechnet. Dieses entspricht einer Steigerung von rd. 20 %. Für die Kaltgasschicht gilt, daß die stärkste Veränderung von + 1.6 Vol.-% Kohlendioxid im Brandraum berechnet wird. Diese Differenz wird zu beiden Seiten der Brandlast mit zunehmender Entfernung kleiner. Die Veränderungen zur 1. Segmentierung sind hinter der Brandlast geringer als vor der Brandlast. Im Querschnitt -45 m wird eine Differenz von + 0.4 Vol.-% gegenüber der 1. Segmentierung berechnet, was einer prozentualen Abweichung von +60 % entspricht. Hinter der Brandlast im Querschnitt $+45$ m beträgt die Differenz + 0.2 Vol.-% (entsprechend +20 %).

7.3 Zusammenfassung

7.3.1 1. Variation

Bei der ersten Variation der Segmentierung wurde der Berechnungsbereich auf der Seite hinter der Brandlast bis Querschnitt $+475$ m verlängert. Vor der Brandlast beginnt der Bereich im Querschnitt -15 m. Verglichen werden hier die erste und zweite Segmentierung.

Bei der 2. Segmentierung wird von den Eingabedaten festgelegt, daß im Querschnitt -15 m die Umgebung außerhalb des Tunnels beginnt, und somit an diesem Ort die äußeren Umgebungsbedingungen für die Kaltgasschicht zur Verfügung gestellt wer-

den. Dieses wird auch in den berechneten Temperaturen der Kaltgasschicht gegenüber der 1. Segmentierung bemerkbar. Auf die Temperaturen in der Heißgasschicht des Querschnittes -10 m hat die geänderte Segmentierung keine Auswirkung. Die Heißgase werden weiterhin aus dem Brandraum in Richtung Portal transportiert.

Hinter der Brandlast wird zwischen der 10. und 20. Minute sowohl in der Heiß- als auch Kaltgasschicht ein Temperaturmaximum gemessen. Dieses wird von den berechneten Werten nicht wiedergegeben.

Für die CO_2 -Konzentrationen der Heißgasschicht hinter der Brandlast werden mit der 2. Segmentierung geringere Werte berechnet als mit der ersten Segmentierung. Dennoch sind die berechneten Werte ca. doppelt so groß wie die gemessenen Werte.

In der Kaltgasschicht werden mit der zweiten Segmentierung für die Querschnitte $+20$ m und $+30$ m höhere CO_2 -Konzentrationen als mit der ersten berechnet.

Wie bei allen bisher besprochenen Berechnungen wurde eine CO-Konzentration von 0 Vol.-% berechnet.

Der gemessene Extinktionskoeffizient der Heißgasschicht im Querschnitt $+300$ m wird mit der 2. Segmentierung mit relativ guter Annäherung berechnet.

Randraum	Größe	Veränderung der 2. Segmentierung gegenüber der 1. Segmentierung
-10 m	T_G	+1 %
	T_L	-50 %
	$\text{CO}_{2,G}$	-20 %
	$\text{CO}_{2,L}$	-80 %
$+45$ m	T_G	-10 %
	T_L	+35 %
	$\text{CO}_{2,G}$	-20 %
	$\text{CO}_{2,L}$	+100 %

Tabelle 7.3: Vergleich der mittleren Ergebnisse in den Randräumen bei erster Variation

7.3.2 2. Variation

Für die 2. Variation wird in die Geometriedaten der ersten Segmentierung der geodätische Höhenverlauf des Tunnelbodenniveaus eingearbeitet. Der Bereich, für den die Berechnungen ausgeführt werden, ändert sich nicht.

Die Temperaturen der Heißgasschicht werden für die 3. Segmentierung in den meisten Querschnitten etwas geringer als für die erste Segmentierung berechnet. Nur in den Querschnitten -10 , ± 0 und $+10$ m wurden mit der 3. Segmentierung geringfügig höhere Temperaturwerte berechnet.

Für die Kaltgasschicht ergeben sich keine gravierenden Unterschiede. Die Abweichung nach Gl.(7.1) liegt zwischen $+8$ und -8 %, wobei die positiven Abweichungen für den Bereich hinter der Brandlast berechnet wurden.

Die CO_2 -Konzentrationen liegen bei der 3. Segmentierung durchgehend um rd. 0.5 Vol.-% über denen der 1. Segmentierung.

Randraum	Größe	Veränderung der 3. Segmentierung gegenüber der 1. Segmentierung
-45 m	T _G	nicht auswertbar
	T _L	-8 %
	CO _{2,G}	+25 %
	CO _{2,L}	+60 %
+45 m	T _G	-10 %
	T _L	+8 %
	CO _{2,G}	+20 %
	CO _{2,L}	+20 %

Tabelle 7.4: Vergleich der mittleren Ergebnisse in den Randräumen bei zweiter Variation

8 Flucht und Rettung

8.1 Gefahr durch Heiß- und Rauchgase

Die Art und Vielfalt der durch Verschmelzung und/oder Verbrennung entstehenden Brandgase ist abhängig vom Brennstoff, aber auch von den Brandbedingungen. Am Beispiel eines organischen Stoffes wie Holz soll die komplexe Zusammensetzung der Brandgase aufgezeigt werden.

Bei einer vollständigen Verbrennung entstehen als Brandgase Kohlendioxid und Wasserdampf, geringe Mengen an Kohlenmonoxid sowie Ruß in Form von Kohlenstoff (C). Während der Verschmelzung (Pyrolyse), die bei einem natürlichen Brand der eigentlichen Verbrennung vorausgeht, wird unter anderem Wasser, Methanol, Methan, Wasserstoff, Essigsäure, Ameisensäure, Aceton, Formaldehyd, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid (Holzgas) gebildet [20]. Trotz einer auf die Pyrolyse folgenden Verbrennung, bei der diese Brandgase zu CO_2 , CO , H_2O und C weiter verbrennen, können die während der Pyrolyse gebildeten Brandgase auch in den Heißgasen auftreten.

Bei der Verbrennung von stickstoffhaltigen Produkten (z.B. Wolle, textile Sitzbezüge) können Blausäure (HCN) oder Stickoxide (NO_x) durch die Verbrennung in die Heißgase gelangen.

Lfd.	Komponente	Formel	[mg/gPVC]
1	Chlorwasserstoff	HCl	583.0
2	Essigsäure	CH_3COOH	-
3	Kohlendioxid	CO_2	729.0
4	Kohlenmonoxid	CO	442.0
5	Methan	CH_4	4.6
6	Ethylen	C_2H_4	0.58
7	Ethan	C_2H_6	2.2
8	Propylen	C_3H_6	0.47
9	Propan	C_3H_8	0.84
10	Vinylchlorid	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	0.60
11	Buten - (1)	C_4H_8	0.18
12	Butan	C_4H_{10}	0.28
13	Isopenten	C_5H_{10}	0.02
14	Penten - (1)	C_5H_{10}	0.06
15	Pentan	C_5H_{12}	0.16
16	Cyclopenten	C_5H_{10}	0.05
17	Cyclopentan	C_5H_{12}	0.05
18	Hexen - (1)	C_6H_{12}	0.05
19	n-Hexan	C_6H_{14}	0.12
20	Methylcyclopentan	$\text{C}_5\text{H}_9\text{CH}_3$	0.04
21	Benzol	C_6H_6	36.0
22	Toluol	C_7H_8	1.3

Tabelle 8.1: Flüchtige Brandgase von Polyvinylchlorid (PVC) nach [2]

Wegen der Vielfalt an möglichen Verbrennungsprodukten (vergl. Tab. 8.1) ist eine komplette Analyse der Verbrennungsgase nicht möglich. Deshalb wird der Umfang der durchgeführten Gasanalyse auf die wesentlichen Verbrennungsgase wie CO_2 und CO beschränkt. Von RENNOCH [19] wird auf die herausragende Rolle der Kohlenmonoxidbildung bezüglich der Gefahren durch toxische Gase hingewiesen, was die Auswahl der gemessenen Gaskomponenten bekräftigt.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der von der CO_2 - und CO-Analyse gelieferten Meßwerte ist die Berechnung der Energiefreisetzungsrate, die voraussichtlich in [3] ausführlich dargestellt wird.

Bei der toxischen Wirkung von z.B. Kohlenmonoxid ist nicht nur die Höhe der Konzentration dieser Gaskomponente in der Atemluft von Bedeutung, sondern auch der Zeitraum, während dem eine Person diesem Gas ausgesetzt ist (Expositionsdauer). Nach RENNOCH [19] besteht bei einem Brand für einen Menschen keine Fluchtmöglichkeit mehr, wenn der CO-Gehalt im Blut (COHb-Wert) 50 % erreicht (2500 ppm). Der gesundheitliche Zustand ist aber reversibel besserbar, wenn der COHb-Wert wieder auf ein erträgliches Maß sinkt. Bei einem COHb-Wert zwischen 60 und 70 % ist die äußerste Grenze, bei der eine Rettung noch durchzuführen ist, erreicht.

Eine starke Gefährdung von menschlichem Leben durch die mögliche toxische Wirkung der Heißgase besteht für den Fall, daß durch Stoffaustausch der beiden Schichten untereinander die Heißgase auch in die untere Schicht, die Kaltgasschicht, gelangen, in der sich Menschen während der Flucht- bzw. Rettungsphase aufhalten, und aus der sie ihre Atemluft beziehen.

HEINS gibt in [10] Grenzwerte für O_2 , CO und die CO_2 Konzentration in der Kaltgasschicht für eine Expositionsdauer von 30 Minuten an, nach deren Überschreitung mit einer eingeschränkten Fluchtfähigkeit gerechnet werden muß. Die Grenzwerte sind in Tab. 8.2 auszugsweise zusammengestellt.

Meßgröße	Grenzwert	
O_2 -Konzentration	\geq	16 Vol.-%
CO-Konzentration	\leq	500 - 1000 ppm
CO_2 -Konzentration	\leq	4 Vol.-%
Kaltgastemperatur	\leq	100 °C

Tabelle 8.2: Grenzwerte für die Kaltgasschicht

Weiterhin besteht die Gefahr der Bildung von Furanen und Dioxinen. Dieses Gefährdungspotential wurde 1992 bei zwei Versuchen von WICHMANN, ZELINSKI u.A. [23] untersucht.

Im folgenden wird das Gefährdungspotential durch die CO-Konzentration in der Kaltgasschicht untersucht. In Abb. 8.1 ist die CO-Konzentration der im vorliegenden Bericht bearbeiteten Versuche im Querschnitt –20 m in 1.5 m Höhe dargestellt. Zusätzlich ist in der Abb. 8.1 das Meßergebnis der gleichen Stelle aus dem Versuch mit dem U-Bahnwagen F4 dargestellt. Der im Versuch mit F4 dem Tunnel zugeführte Kaltluftvolumenstrom liegt vom Betrag her zwischen denen vom Holzkrippenversuch Nr. 3 und der Mischbrandlast.

Für die Darstellung wurde der Querschnitt –20 m gewählt, weil dieser auf dem möglichen Fluchtweg zwischen der Brandlast und dem Portal, sowie entgegen der Kaltluftströmung liegt.

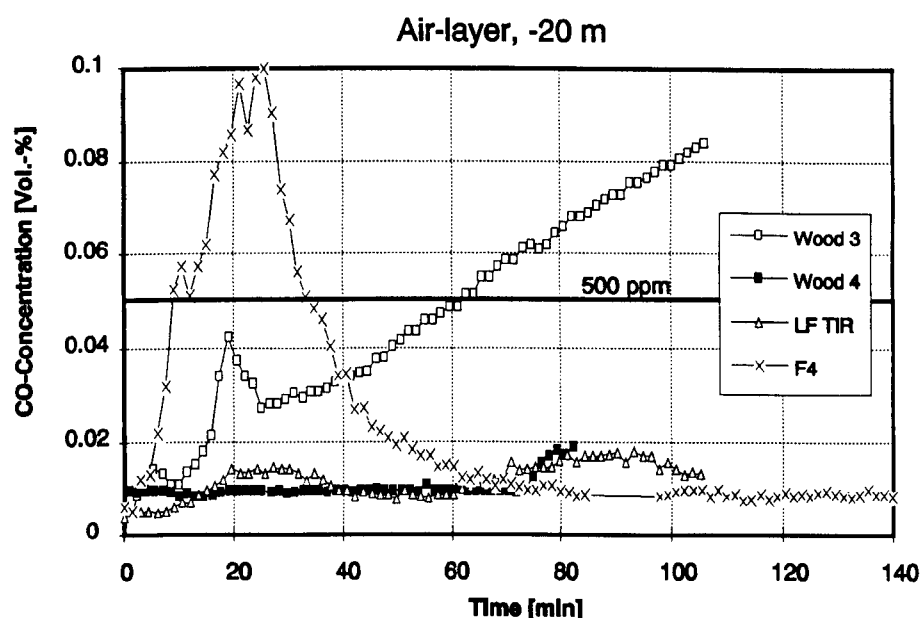


Abbildung 8.1: Zeitabhängige Kohlenmonoxidkonzentration im Querschnitt –20 m, Meßhöhe: 1.5 m

In die Abb. 8.1 ist der untere Grenzwert für die CO-Konzentration aus Tab. 8.2 eingezeichnet. Gemäß einer Untersuchung der Brandschutzabteilung der Hamburger Feuerwehr [4] wird in Tunnelanlagen des Öffentlichen Personennahverkehrs mit Evakuierungszeiten von bis zu 30 Minuten gerechnet.

Im Versuch mit dem U-Bahnwagen F4 wird die o.a. Grenzkonzentration bereits nach 8 Minuten Branddauer überschritten. Maximal wird der Wert von 1000 ppm um die 26. Minute registriert.

Beim Holzkrippenversuch Nr. 3 wird die Konzentration von 0.05 Vol.-% nach ca. einer Stunde überschritten. Dieser Grenzwert wird bei den Versuchen Mischbrandlast und Holzkrippenversuch Nr. 4 über die gesamte Versuchsdauer hinweg nicht erreicht, wobei im Holzkrippenversuch Nr. 4 im Querschnitt –20 m die geringste CO-Belastung der Atemluft festgestellt wurde.

Während dieses Versuches wurde bezüglich der hier betrachteten Versuche mit dem größten Kaltluftvolumenstrom gearbeitet. Im Querschnitt –20 m wurde in rd. 3 m Höhe die maximale Geschwindigkeit $v_{\max} = 3.74 \text{ m/s}$ gemessen. Daraus resultiert für den Querschnitt –20 m ein Volumenstrom $\dot{V} \approx 129 \text{ m}^3/\text{s}$, wenn die maximale Geschwindigkeit als konstant über den Querschnitt betrachtet wird.

Somit kann festgestellt werden, daß die beschriebenen Belüftungsverhältnisse während des Holzkrippenversuches Nr. 4 eine Heißgasausbreitung auf die Zuluftseite des Tunnels verhindern.

Bis zur 70. Minute wurde im Durchschnitt eine CO-Konzentration von 0.01 Vol.-% gemessen. Das Ansteigen der CO-Konzentration um die 72. Minute beim Holzkrippenversuch Nr. 4 erfolgt, weil der Betrieb des Ventilators zwischen der 71. und 72. Minute eingestellt wurde.

Die CO₂-Konzentration in der Kaltgasschicht sollte möglichst die Konzentration von 4 Vol.-% nicht überschreiten (Tab. 8.2). Für den Versuch mit der Mischbrandlast (LF TIR) wurde in der Abb. 6.30 die Kohlendioxidkonzentration in der Kaltgasschicht in den Querschnitten ± 30 m dargestellt. Daraus ergibt sich, daß die Grenzkonzentration von 4 Vol.-% nicht erreicht wurde (vgl. Abb. 6.30). Werden die berechneten Daten zu einer Aussage betreffs der Kohlendioxidkonzentration herangezogen, so liegen die berechneten Werte über den gemessenen Werten, aber ebenfalls unterhalb der Grenzkonzentration.

In Abb. 8.2 ist die Entwicklung der gemessenen CO₂-Konzentration in der Kaltgasschicht der Versuche Mischbrandlast LF TIR und U-Bahnwagen F4 im Bereich vor der Brandlast dargestellt.

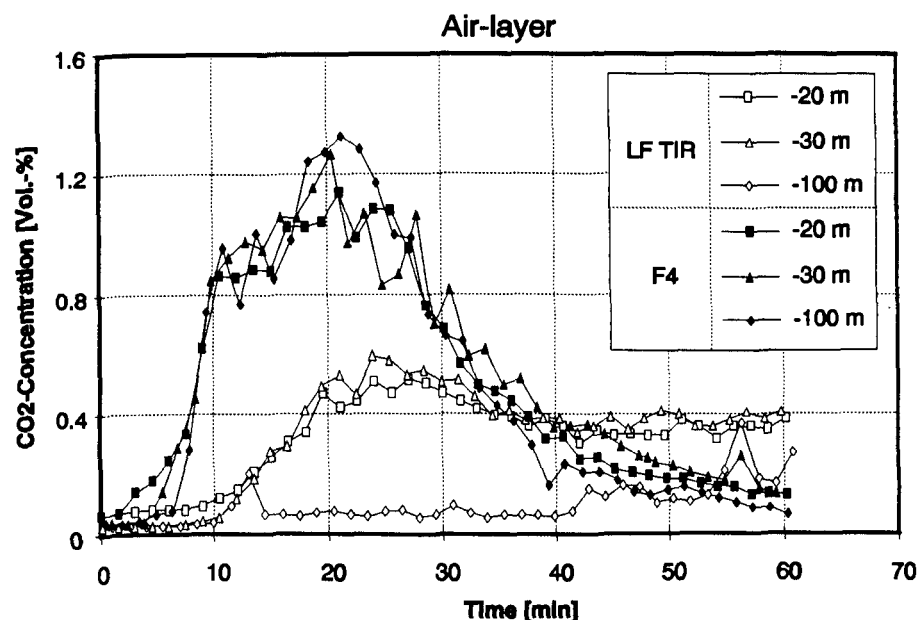


Abbildung 8.2: CO₂-Konzentration der Kaltgasschicht im Bereich vor der Brandlast

Aus der Abb. 8.2 ist zu erkennen, daß beim U-Bahnwagen F4 die CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von der Entfernung zur Brandlast zunächst zeitlich verzögert ansteigt. Zwischen 10. und 40. Minute ist kein großer Unterschied der Konzentrationen bezüglich der Entfernung zum Brandherd zu erkennen.

Die unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen der beiden dargestellten Versuche ist sicherlich nicht nur auf die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen zurückzuführen. Die Zusammensetzung und der Aufbau der Brandlast besitzen ebenfalls einen Einfluß. Die Grenzkonzentration von 4 Vol.-% wird während beider Versuche in der Kaltgasschicht nicht erreicht.

8.2 Gefahr durch Verbrennungen

Eine weitere Gefährdung besteht durch die Hitzeeinwirkung auf Personen, die zu Verbrennungen führen können. Für den Bereich in unmittelbarer Umgebung der Brandlast ist die stärkste Wärmeeinwirkung zu erwarten. Deswegen werden in Abb. 8.3 für die Mischbrandlast und Abb. 8.4 für den U-Bahnwagen F4 die Temperaturen im Bereich zwischen den Querschnitten -20 und $+20$ m in ein Meter Höhe über dem Tunnelboden dargestellt.

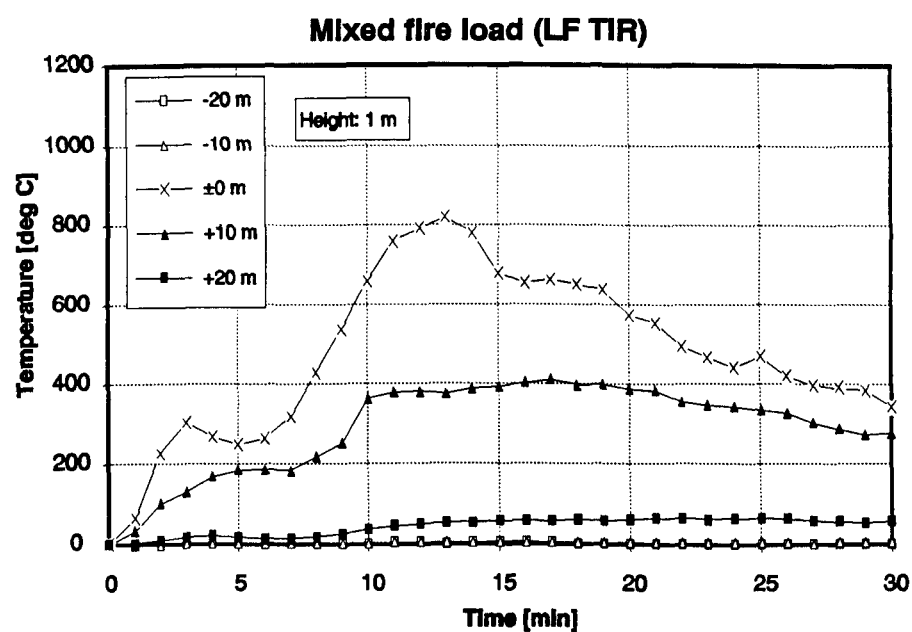


Abbildung 8.3: Mischbrandlast: Temperaturen im Bereich von -20 bis $+20$ m, Meßhöhe: 1.0 m

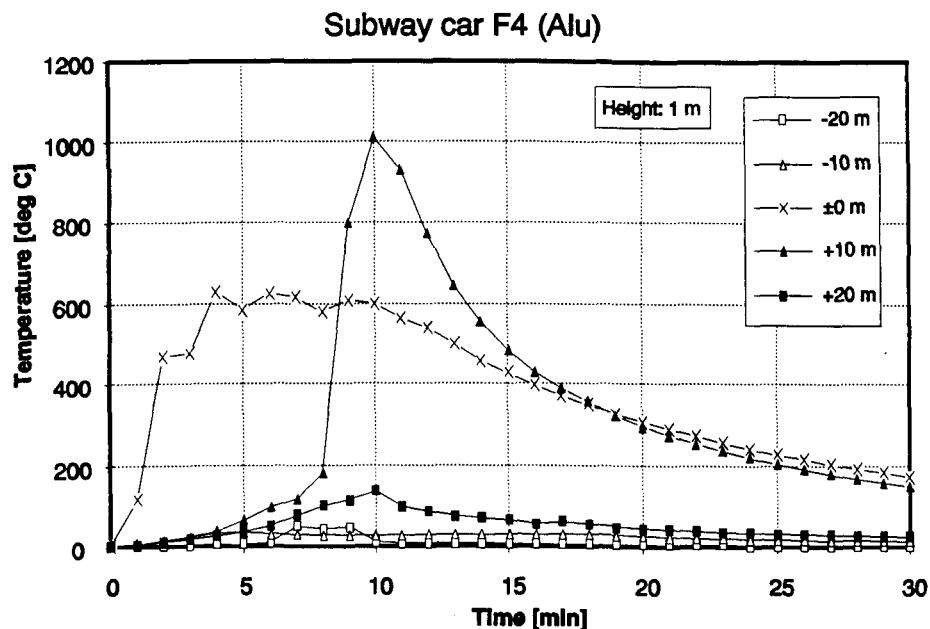


Abbildung 8.4: U-Bahnwagen F4: Temperaturen im Bereich von -20 bis +20 m, Meßhöhe: 1.0 m

Bei beiden Versuchen steigen die Temperaturen schnell über 100 °C; dies gilt insbesondere für den Bereich zwischen Querschnitt ± 0 m und Querschnitt +10 m. Die Möglichkeit, über diesen Bereich Flucht- und Rettungsmaßnahmen vorzunehmen ist damit stark eingeschränkt.

Ein weiteres Detail ist hier noch aufzuführen:

Entscheidend für die Temperatur in unmittelbarer Nähe der Brandstelle ist, zu welcher Seite die Flammen aus dem Fahrzeug schlagen. Werden die zu beiden Seiten der Brandlast gemessenen Temperaturen im Querschnitt ± 0 m miteinander verglichen (Abb. 8.5), so zeigen beide Versuche die Tendenz zu höheren Temperaturen auf der linken Seite.

Eine mögliche Ursache für diese ungleichmäßige Temperaturverteilung ist, in welchen Winkel eine Luftströmung in Richtung der Tunnelachse auf die Brandlast trifft. Eine andere Ursache könnte sein, auf welcher Seite eines brennenden Fahrzeuges zuerst die Scheiben bersten und die Flammen aus dem Fahrzeug herausschlagen können.

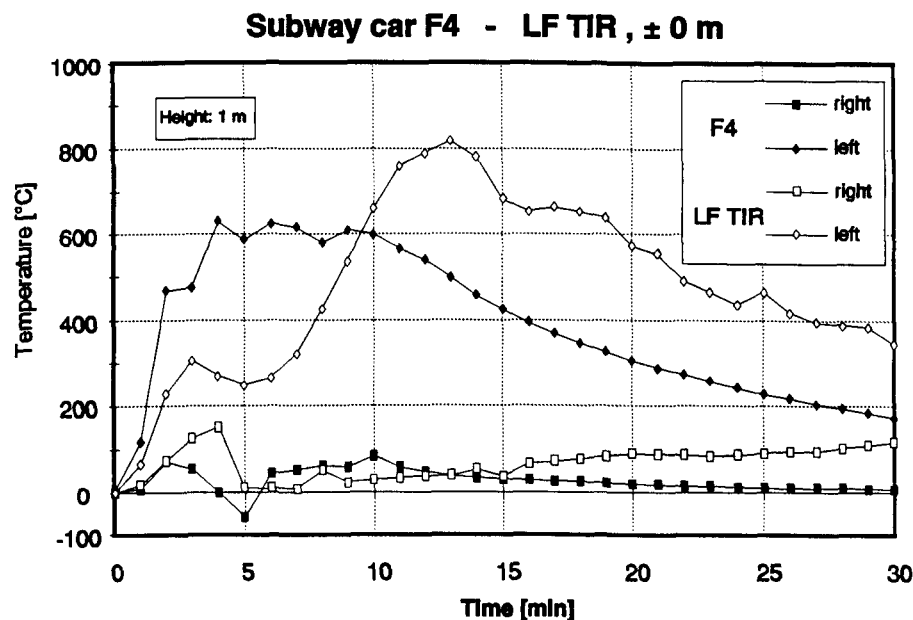


Abbildung 8.5: Temperaturen links und rechts der Brandlast bei den Versuchen Mischbrandlast (LF TIR) und U-Bahn F4, Querschnitt ± 0 m, Meßhöhe: 1 m

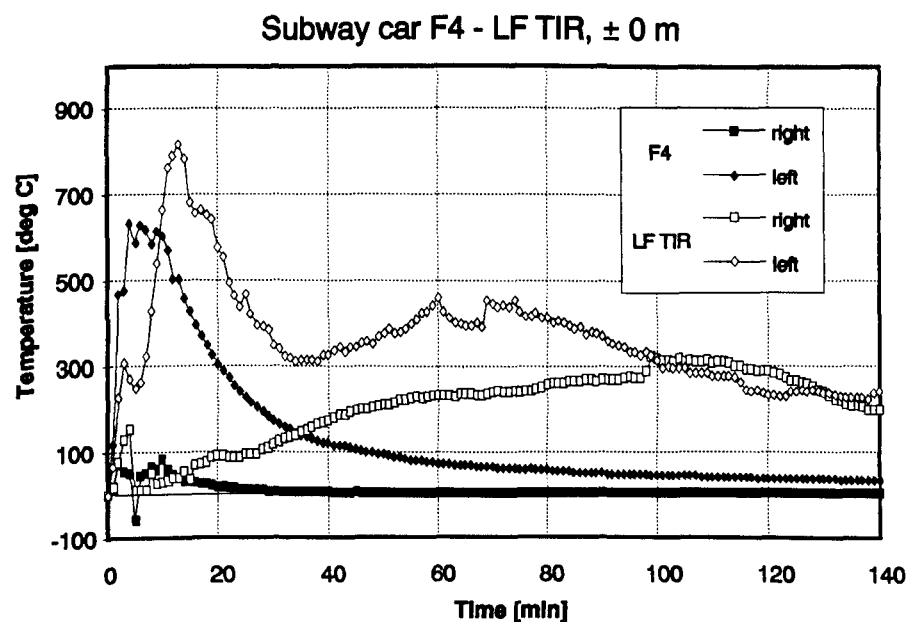


Abbildung 8.6: Temperaturen links und rechts der Brandlast bei den Versuchen Mischbrandlast (LF TIR) und U-Bahn F4, Querschnitt ± 0 m, Meßhöhe: 1 m über die gesamte Versuchsdauer

In der vorderen Hälfte des Fahrzeuges ist die Hauptbrandphase, abgeschätzt aus den innerhalb des Fahrzeuges gemessenen Temperaturen, bereits nach rd. 30 Minuten

vorüber. Weil die Flammen bevorzugt nach hinten links aus dem Fahrzeug schlagen, ist die Temperatur außerhalb des Fahrzeuges auf der linken Seite nach 30 Minuten ebenfalls schon stark abgesunken (Abb. 8.6). Vermutlich verhindert der Körper des Fahrzeuges während der gesamten Versuchsdauer eine Erwärmung der rechten Tunnelwand.

Bei dem Versuch mit der Mischbrandlast erwärmt sich die rechte Tunnelseite nicht so stark wie die linke, aber eine deutliche Erwärmung ist erkennbar. Weil hier die trennende Wirkung eines Fahrzeugkörpers fehlt, steigen die Temperaturen mit der Versuchsdauer auf der rechten Seite ebenfalls an.

Beim Versuch mit der Mischbrandlast liegen die berechneten Temperaturen der Kaltgasschicht im Bereich von der Brandlast bis zum Querschnitt -10 m über den gemessenen Werten. Im Bereich von ± 0 m bis $+10$ m werden deutlich geringere Temperaturen berechnet als gemessen, so daß hier die berechneten Werte nicht zu weiterführenden Schlußfolgerungen herangezogen werden sollten.

9 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Erkenntnisse über die Rauch- und Heißgasbewegung in unterirdischen Verkehrsanlagen zu erlangen.

Das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau hat das Forschungsvorhaben durch Bereitstellung zusätzlicher Meßgeräte zur Erfassung der Rauchdichte gefördert und dadurch das BMFT-Projekt „Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen - Fahrzeugbrandversuche in Norwegen“ [3] entscheidend unterstützt. Weiterhin wurden Mittel zur Durchführung von Vergleichsrechnungen mit dem Rechenprogramm FIGARO bereitgestellt. Dieses Rechenprogramm ist aus dem von HEINS am iBMB, unter Finanzierung des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, entwickelten Modelles hervorgegangen.

Im vorliegenden Bericht ist die Durchführung von Vergleichsrechnungen mit dem Rechenprogramm FIGARO beschrieben. Die zum Vergleich benötigten Meßdaten wurden aus Tunnelbrandversuchen mit natürlichen Brandlasten gewonnen.

Für das Programm ist die Vorgabe der Abbrandrate erforderlich. Aus diesem Grunde eignen sich von den 1992 in Norwegen durchgeführten Brandversuchen (Tab. 3.1) diejenigen Versuche am besten, bei denen eine Abbrandwaage eingesetzt wurde. Dies war bei den Bränden mit Holzkrippen und der Mischbrandlast der Fall.

Für die Vergleichsrechnungen werden zwei Brandversuche mit Holzkrippen mit unterschiedlich großem zugeführten Luftvolumenstrom und ein Brandversuch mit Mischbrandlast, die der Ladung eines Lkw entsprochen hat, ausgewählt. Die Mischbrandlast bestand aus Holz, Autoreifen und Plastik. In diesem Versuch wurde ein vergleichsweise geringer Luftvolumenstrom zugeführt.

Die Vergleichsrechnungen konzentrieren sich somit auf die Variation der Parameter Luftvolumenstrom, sowie Art und Menge der Brandlast.

Zusätzlich wird die Segmentierung, d.h., die rechentechnische Einteilung des Tunnels in Längsrichtung, variiert. Die Segmentierung des Tunnels stellt einen wichtigen Eingabeparameter dar, weil durch die Wahl der Segmente die Kontrollvolumina für die Berechnung festgelegt werden. Die Segmentierung wird am Beispiel der Mischbrandlast durch Verlängerung des Bereiches, für den die Zustandsgrößen berechnet werden, und durch Berücksichtigung der geodätischen Höhe variiert.

Die Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichem Luftvolumenstrom, d.h., Variation der Ventilationsbedingungen, ergeben, daß der Fluchtweg möglichst entgegen der Strömungsrichtung des sich als Pfropfenströmung ausbildenden zugeführten Luftvolumenstroms eingeschlagen werden sollte. Wird genügend Luft zugeführt, so kann der stromaufwärts zur Brandlast gelegene Bereich rauchfrei gehalten werden.

Auf der stromabwärts liegenden Seite der Brandlast kommt es bei größerem Luftvolumenstrom zu Verwirbelungen, wodurch die Heißgase in kürzester Zeit den Tunnelboden erreichen. In Abhängigkeit von der Brandlast und der Energiefreisetzungsrates können

in 100 m Entfernung zur Brandlast nach einer Branddauer von rd. 14 Minuten über 200 °C erreicht werden.

Bei den Berechnungen ergeben sich gute Übereinstimmungen von berechneten und gemessenen Heiß- und Kaltgastemperaturen. Bezogen auf die hier vorgestellten drei Versuche werden für den Versuch mit geringem Luftvolumenstrom (Mischbrandlast) Temperaturen von maximal etwa 700 °C in der Heißgasschicht berechnet, die die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Werten zeigen. Der Fall, daß die Temperaturen niedriger berechnet als gemessenen werden, tritt in der Heißgasschicht in dem stromabwärts zur Brandlast gelegenen Bereich nur beim Versuch ohne zugeführten Luftvolumenstrom (Holzkrippenversuch Nr. 3) ein; die Differenz beträgt rd. 100 °C gegenüber hier maximal gemessenen Temperaturen von etwa 500 °C.

Für die Temperaturen in der Kaltgasschicht ergibt sich die beste Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung bei dem Versuch mit großem Luftvolumenstrom (Holzkrippenversuch Nr. 4). Beim Versuch mit der Mischbrandlast werden für die Kaltgasschicht stromabwärts und in unmittelbarer Nähe der Brandlast geringere Temperaturen berechnet als gemessen.

Die Untergrenze der berechneten Heißgasschicht wird für die drei ausgewählten Versuche zu hoch liegend ermittelt. Dabei ist zu bedenken, daß die Berechnungen für einen Rechteckquerschnitt durchgeführt werden, der wirkliche Tunnelquerschnitt hingegen in den Ecken abgerundet oder abgeflacht war. Dadurch ist eine tiefere Lage der Heißgasgrenzschicht im Versuch gegenüber der Lage aus den Berechnungen mit einem Rechteckquerschnitt möglich.

Aus den visuellen Beobachtungen wird deutlich, daß sich die Dicke der Rauchgasschicht nur ungenügend aus den gemessenen Temperaturprofilen bestimmen läßt. Im stromaufwärts zur Brandlast gelegenen Bereich gelangen sichttrübende Rauchpartikel durch Mischungsprozesse und Abkühlung in die Kaltgasschicht, auch wenn eine gut ausgebildete Schichtung von Heiß- und Kaltgasen vorliegt. Die Beobachtungen mit einer stromabwärts der Brandlast installierten Videokamera zeigen, daß die Rauchgasgrenzschicht innerhalb von 5 bis 10 Minuten bis auf den Boden herabsinkt, und somit die Sichtverhältnisse ohne deutliche Temperaturerhöhung stark verschlechtert. Das heißt, die Entwicklung von verrauchten Zonen muß unabhängig von der Temperaturentwicklung gesehen werden. Vor diesem Hintergrund erscheint eine deutliche sprachliche Trennung in Heißgas- und Rauchgasschicht notwendig.

Die für eine erfolgreiche Flucht notwendigen guten Sichtverhältnisse in der Kaltgasschicht werden durch den Grad der Verqualmung und die Beleuchtungsverhältnisse bestimmt. Die Sichtbehinderung durch den Rauch repräsentiert der Extinktionskoeffizient k , der den Betrag von $k = 0.12 \text{ m}^{-1}$ nicht überschreiten darf, wenn über eine Entfernung von 25 m ein reflektierendes Hinweisschild noch erkennbar sein soll.

Gemessen an den visuellen Beobachtungen wird dieser Grenzwert für die Kaltgasschicht überschritten, wobei aus den Beobachtungen kein Zahlenwert angegeben werden kann. Die für die Kaltgasschicht berechneten Extinktionskoeffizienten liegen eben-

falls oberhalb des Grenzwertes, so daß die Verqualmung der Kaltgasschicht, gemessen an den visuellen Beobachtungen, tendenziell richtig berechnet wird.

Die Konzentration der Rauchgase im Tunnel stellt eine weitere charakteristische Größe zur Beurteilung der Anwendbarkeit des vorgestellten Rechenprogramms für Tunnelanlagen dar. Die berechneten Kohlendioxidkonzentrationen zeigen eine ähnliche Charakteristik wie die gemessenen Werte. Die vom Programmlauf berechneten CO₂-Konzentrationen liegen oberhalb der gemessenen Konzentrationen und liegen somit hinsichtlich der Toxizität auf der sicheren Seite. Dies gilt für die Heiß- und die Kaltgasschicht.

Die bei den Versuchen in der Kaltgasschicht gemessenen CO-Konzentrationen von 0.04 Vol.-% und mehr werden in den Berechnungen nicht erreicht. Die gemessenen Konzentrationen liegen annähernd im Bereich der Grenzkonzentration für CO in der Atemluft (0.05 Vol.-%), ab der nach einer Expositionsdauer von 30 Minuten mit ernsthaften Folgen für den Menschen gerechnet werden muß. Um eine bessere Annäherung zwischen berechneten und gemessenen Werten zu erreichen, muß das Bildungsgesetz im Rechenprogramm für die Gaskonzentrationen, das auf einem einfachen Ansatz über die Wassergasreaktion zur CO-Bildung beruht, überarbeitet werden.

Aus der vorgenommenen Variation der Segmentierung ergibt sich, daß eine Bedingung erarbeitet werden muß, mit der beliebig ausgewählte Abschnitte des Tunnels berechnet werden können. Zur Zeit wird für die Randräume der Segmentierung angenommen, daß sie mit der Außenluft in Kontakt stehen und somit die Tunnelportale simulieren. Bei längeren Tunneln oder wenn die Brandlast nicht in der Nähe eines Portales angeordnet ist, kann eine Segmentierung erforderlich werden, bei der mindestens ein Randraum nicht mit der Lage des Portales zusammenfällt. Mit dem hier verwendeten Programm werden die charakteristischen Größen der Kaltgasschicht in den Randräumen nicht richtig erfaßt (z.B. wird ein zu geringer Extinktionskoeffizient im Randraum berechnet). Mit einem ergänzenden Modul kann das Programm angepaßt werden.

Bei den Versuchen in Norwegen ist das rasche Absinken der Heißgase in die Kaltgasschicht durch Abkühlung an den Umfassungsbauteilen beobachtet worden; dadurch wird eine rasche und starke Verrauchung der Kaltgasschicht eingeleitet. Dieser Effekt wird zur Zeit ungenügend im Rechenprogramm berücksichtigt, weshalb auf diesem Gebiet weitere Arbeiten erforderlich sind.

Schließlich ergibt sich für Tunnelanlagen mit sehr hohem Feuchtigkeitsgehalt noch die Fragestellung, inwiefern die Feuchtigkeit auf den Umfassungsbauteilen und in den Gasschichten Rauchpartikel bindet und so einen Reinigungseffekt innerhalb der Schichten bewirkt.

Zusammenfassend zeigt sich, daß das Programm FIGARO für vergleichsweise kurze Tunnel die physikalischen Parameter zutreffend erfaßt, die zur Beschreibung der Brandphänomene wie Rauchausbreitung, Sichtweite, Schichtung der Heiß- und Kaltgase sowie Reduzierung toxischer Bestandteile in Abhängigkeit vom Brandherd not-

wendig sind. In Sonderfällen sind Modifikationen erforderlich.

Die Rechenergebnisse sind abhängig von den gewählten Eingabeparametern wie Abbrandrate, Segmentierung usw. und von den verwendeten Ansätzen zur Ermittlung und Beschreibung der physikalischen Größen (physikalische Gleichungen, chemische Prozesse, empirische Ansätze aufgrund von Versuchen). Ein Rechenprogramm, wie z.B. FIGARO, daß nachweislich die physikalischen Werte eines realen Großversuches zutreffend wiedergibt, kann als ein effektives Instrument für Ingenieurmethoden zur Beurteilung der Brandsicherheit angesehen werden.

Es ist deshalb geplant, das Rechenprogramm FIGARO in ISO TC 92/SC4 „Fire Safety Engineering“ von deutscher Seite einzubringen, um bei internationalen Modellvergleichen und Verifikationen beteiligt zu sein.

Literaturverzeichnis

- [1] APTE, V.B.; GREEN, A.R.; KENT, J.H. *Pool Fire Plume Flow in a large-Scale Wind Tunnel*, Fire safety science-proceedings of the third international Symposium, Elsevier Science Publishers Ltd. London and New York (1991)
- [2] AUTIAN, J.: *Toxicologic aspects of flammability and combustion of polymeric materials*, Journal of fire and flammability 1 (July 1970), S. 239-248
- [3] *Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen - Fahrzeugbrandversuche in Norwegen*, FuE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 13RG9004/2. 1990. Forschungsnehmer: Studiengesellschaft für Stahlanwendung, Düsseldorf; wissenschaftliche Betreuung und Durchführung der Brandversuche: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig; Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, Köln und Institut für ökologische Chemie und Abfallanalytik der Technischen Universität Braunschweig.
- [4] BRANDSCHUTZABTEILUNG DER HAMBURGER FEUERWEHR: *Brandschutz bei der Hamburger U-Bahn*, Hamburg 1983, unveröffentlicht
- [5] McCAFFREY, B.J.; HESKESTAD, G.: *A robust Bidirectional low-velocity probe for flame and fire application*, Combustion and flame **26**, 125-127, 1976
- [6] DIEDERICH, U.; ROSENBERGER, W.; SCHNEIDER, U.: *Basalt-Beton, Eigenschaften und Verwendung*, Basalt-Union GmbH Bonn informiert, April 1981, S. 5-6
- [7] DRYSDALE, D.: *An Introduction to Fire Dynamics*, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore 1985
- [8] EGRESI, M.; PRAGER, F.H.; SASSE, H.R.; WITTBECKER, F.-W.; ZORGMANN, H.: *Risikoorientierte Prüfung und Bewertung von Rauchgasdichten*, vfdb 1/92, S. 23-27
- [9] HAACK, A.: *Fire protection in traffic tunnels - initial recognitions from large scale tests*, Proceedings of the first International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, 23 - 25 November 1992, Basel, Switzerland; Published by the University of Dundee, ISBN 0 9520083 0 0
- [10] HEINS, T.: *Untersuchungen über die Brand- und Rauchentwicklung in unterirdischen Verkehrsanlagen — Katastrophenschutz in Verkehrstunneln*, Schriftenreihe „Forschung“ des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BI 7-81 07 87-14), 1990, Heft-Nr. 481

- [11] INGENIEURGEMEINSCHAFT LÄSSER–FEIZLMAYR: *Brandversuche in einem Tunnel*, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 50, Teil 1 und 2, Wien, 1976
- [12] KESKI-RAHKONEN, O. ET.AL: *Two full scale pilot fire experiments in a tunnel*, VTT, Technical Research Centre of Finland, Research Reports 453, Finland, 1986
- [13] *Nordtest method: NT FIRE 025; Room fire test in full scale*, Veröffentlichung von NORDTEST, SF-0201 Esbo, ISSN 0283-7188, 1991
- [14] *VDI-Wärmeatlas*, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage, 1984
- [15] EMMONS, H.W.: *Vent flows*, SFPE handbook of fire protection engineering / National Fire Protection Association; Society of Fire Protection Engineers, First edition, S. 1-130–1-137, 1991
- [16] ÖSTMAN, B. A-L.: *Smoke and Soot, Heat Release in Fires*, Elsevier Applied Science, London and New York (1992), S. 233–250
- [17] PRAGER, F.H.: *Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bewertung der Rauchgastoxizität*, Diss. RWTH Aachen, 1985
- [18] PRÖSSDORF, T.: *Einflüsse von Bränden auf die Umwelt*, Der Maschinenschaden 65 (1992) Heft 3, S. 94–100
- [19] RENNOCH, D.: *Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase, I. Teil*, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) Berlin, 1978/79
- [20] ROTH; WELLER: *Gefährliche Chemische Reaktionen*, ecomed-Verlag, 13. Ergänzungslieferung, Feb. 1992
- [21] SBF SVENSKA BRANDFÖRSVARSFÖRENINGEN: *Fire Test of Metro-car for the Stockholm underground system*, Stockholm, 1981
- [22] TROITZSCH, J.: *Brandverhalten von Kunststoffen: Grundlagen – Vorschriften – Prüfverfahren*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1982
- [23] WICHMANN, H.; ZELINSKI, V.; SCHOLZ-BÖTTCHER, B.; LORENZ, W.; BAHADIR, M.: *Bestimmung von polyhalogenierten Dibenzodioxinen/ -furanen und PAK im Brandfall in Verkehrstunnelanlagen*, Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der TU Braunschweig (voraussichtlich 1994)
- [24] ZUKOSKI, E.E.; KUBOTA, T.: *An experimental investigation of the heat transfer from a buoyant gas plume to a horizontal ceiling — Part 2. Effects of Ceiling Layer*, NBS-GCR-77-98, National Bureau of Standards, USA, 1981

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zonenaufteilung im Modell Figaro	12
2.2	Abbrandrate eines U-Bahnwagens	13
2.3	Segmentierung des Plumes	14
2.4	Massenströme in einem Raum	15
2.5	Druckverlauf $p(h)$ in Abhängigkeit von der Höhe (h)	17
2.6	Bildung der Mischungszone zwischen Heiß- und Kaltgasschicht	18
2.7	Rückvermischung von Heißgasen	19
2.8	Zusammenhang zwischen optischer Dichte und Sichtweite nach [8]	21
2.9	Zusammenhang zwischen optischer Dichte und Sichtweite bei mäßiger Beleuchtung nach DRYSDALE [7]	22
3.1	Tunnelgrundriß	24
3.2	Bidirectional probe, Maße in mm	29
4.1	Holzkippenversuch Nr. 3: Heißgasbewegung im Bereich vor der Brandlast; Auswertung anhand der Versuchsbeobachtungen	42
4.2	Holzkippenversuch Nr. 3: Gemessene Abbrandrate \dot{R} (Mass loss)	43
4.3	Gemessene Temperatur im Querschnitt - 45 m in 4.90 m Höhe, Holzkippenversuch Nr. 3	44
4.4	Holzkippenversuch Nr. 3, Höhe der Heißgasschicht über dem Tunnelboden nach 7 Minuten Branddauer	45
4.5	Meßwerte der Licht-Transmission (LT) im Querschnitt +300 m bei den Holzkippenversuchen Nr.3 und Nr.4 in 4.5 m Höhe	46
5.1	Tunnelgeometrie gemäß Eingabedaten	47
6.1	Holzkippenversuch Nr. 3: Vorgabewerte der Abbrandrate \dot{R} [kg/s]	49
6.2	Holzkippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Heißgasschicht im Querschnitt -30 m	50
6.3	Holzkippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Heißgasschicht im Brandraum	51
6.4	Holzkippenversuch Nr. 3: Temperaturentwicklung der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m	52
6.5	Holzkippenversuch Nr. 3: Höhe der Rauchsicht, ermittelt aus der Versuchsbeobachtung mit der stationären Videokamera	53
6.6	Holzkippenversuch Nr. 3: Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte +20 m und +30 m zu ausgewählten Zeitpunkten	54
6.7	Holzkippenversuch Nr. 3: Lage der berechneten Grenzschicht zwischen Heiß- und Kaltgasschicht	55

6.8	Idealisierter Tunnelquerschnitt und Querschnitt aus Eingabedaten . . .	56
6.9	Holzkippenversuch Nr. 3: CO ₂ -Konzentration in der Heißgasschicht im Querschnitt +20 m	57
6.10	Holzkippenversuch Nr. 3: CO-Konzentration in der Kaltgasschicht . .	58
6.11	Holzkippenversuch Nr. 3: Extinktionskoeffizient in der Kaltgasschicht .	59
6.12	Holzkippenversuch Nr. 3: Gemessener Extinktionskoeffizient k im Querschnitt +300 m	59
6.13	Holzkippenversuch Nr. 4: Vorgabewerte der Abbrandrate \dot{R} [kg/s] . . .	60
6.14	Holzkippenversuch Nr. 4: Temperaturentwicklung in der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m	61
6.15	Holzkippenversuch Nr. 4: Temperaturdifferenz nach Gl. 6.1 in der Kaltgasschicht vor der Brandlast	62
6.16	Holzkippenversuch Nr. 4: Lage der berechneten Grenzschicht zwischen Heiß- und Kaltgasschicht	63
6.17	Holzkippenversuch Nr. 4: CO ₂ -Konzentration in der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m	64
6.18	Holzkippenversuch Nr. 4: CO-Konzentration in der Kaltgasschicht der Querschnitte ± 20 m und +30 m	64
6.19	Holzkippenbrandversuch Nr. 4: Berechnete Extinktionskoeffizienten k der Kaltgasschicht im Bereich vor der Brandlast	65
6.20	Holzkippenbrandversuch Nr. 4: Gemessener zeitabhängiger Verlauf des Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m	66
6.21	Mischbrandlast: Abbrandrate	68
6.22	Mischbrandlast: Temperaturen der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m	69
6.23	Mischbrandlast: Temperatur der Heißgasschicht im Querschnitt +45 m	70
6.24	Mischbrandlast: Maximale Temperaturen in der Kaltgasschicht, gemessene Temperaturen auf der Höhe 100 cm	70
6.25	Mischbrandlast: Lage der rechnerischen Heißgasgrenzschicht vor der Brandlast	71
6.26	Mischbrandlast: Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte -20 m und -45 m zu ausgewählten Zeitpunkten	72
6.27	Mischbrandlast: Aus den Versuchsbeobachtungen gemittelte Lage der Rauchgasgrenzschicht vor der Brandlast	73
6.28	Mischbrandlast: Lage der mit der stationären Videokamera beobachteten Rauchgasgrenzschicht hinter der Brandlast	74
6.29	Mischbrandlast: Gemessene Höhenprofile der Temperaturen in der Mitte der Querschnitte +20 m und +30 m zu ausgewählten Zeitpunkten	74
6.30	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene CO ₂ -Konzentration der Kaltgasschicht in den Querschnitten ± 30 m	75
6.31	Mischbrandlast: Gemessene CO-Konzentrationen der Heißgasschicht . .	76
6.32	Mischbrandlast: Gemessene CO-Konzentrationen der Kaltgasschicht . .	77
6.33	Mischbrandlast: Gemessener zeitabhängiger Verlauf des Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m	78

7.1	Lage der Räume bei der 2. Segmentierung	82
7.2	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Heißgasschicht im Querschnitt -10 m	83
7.3	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Heißgasschicht im Querschnitt +20 m	83
7.4	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene Temperaturwerte in der Kaltgasschicht im Querschnitt +30 m	84
7.5	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene Temperaturen in der Kaltgasschicht im Querschnitt +100 m	85
7.6	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene CO ₂ -Konzentration in der Heißgasschicht, Querschnitt +20 m	85
7.7	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene CO ₂ -Konzentration in der Heißgasschicht, Querschnitt +100 m	86
7.8	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene CO ₂ -Konzentration in der Kaltgasschicht, Querschnitt +20 m	87
7.9	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene CO ₂ -Konzentration in der Kaltgasschicht, Querschnitt +100 m	88
7.10	Mischbrandlast: Berechnete und gemessene Extinktionskoeffizienten k im Querschnitt +300 m	89
7.11	Lage der Räume bei der 3. Segmentierung	89
7.12	Abweichung $\Delta T_{3,1}$ der aus der 1. und 3. Segmentierung berechneten Heißgastemperaturen im Bereich vor dem Brandherd	90
7.13	Berechnete Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +45 m	91
7.14	Berechnete Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt -30 m	91
7.15	Vergleich der berechneten Heißgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt -30 m	92
7.16	Vergleich der berechneten Kaltgastemperaturen aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +20 m	93
7.17	Vergleich der berechneten Lage der Heißgasgrenzschicht aus der 1. und 3. Segmentierung im Querschnitt +20 m	94
8.1	Zeitabhängige Kohlenmonoxidkonzentration im Querschnitt -20 m, Meßhöhe: 1.5 m	99
8.2	CO ₂ -Konzentration der Kaltgasschicht im Bereich vor der Brandlast . .	100
8.3	Mischbrandlast: Temperaturen im Bereich von -20 bis +20 m, Meßhöhe: 1.0 m	101
8.4	U-Bahnwagen F4: Temperaturen im Bereich von -20 bis +20 m, Meßhöhe: 1.0 m	102
8.5	Temperaturen links und rechts der Brandlast bei den Versuchen Mischbrandlast (LF TIR) und U-Bahn F4, Querschnitt ± 0 m, Meßhöhe: 1 m	103

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

114

8.6	Temperaturen links und rechts der Brandlast bei den Versuchen Mischbrandlast (LF TIR) und U-Bahn F4, Querschnitt ± 0 m, Meßhöhe: 1 m über die gesamte Versuchsdauer	103
A.1	Versuchsbereich 1992	116

A Lage und Vermaßung der Meßstellen

A.1 Meplan 1992

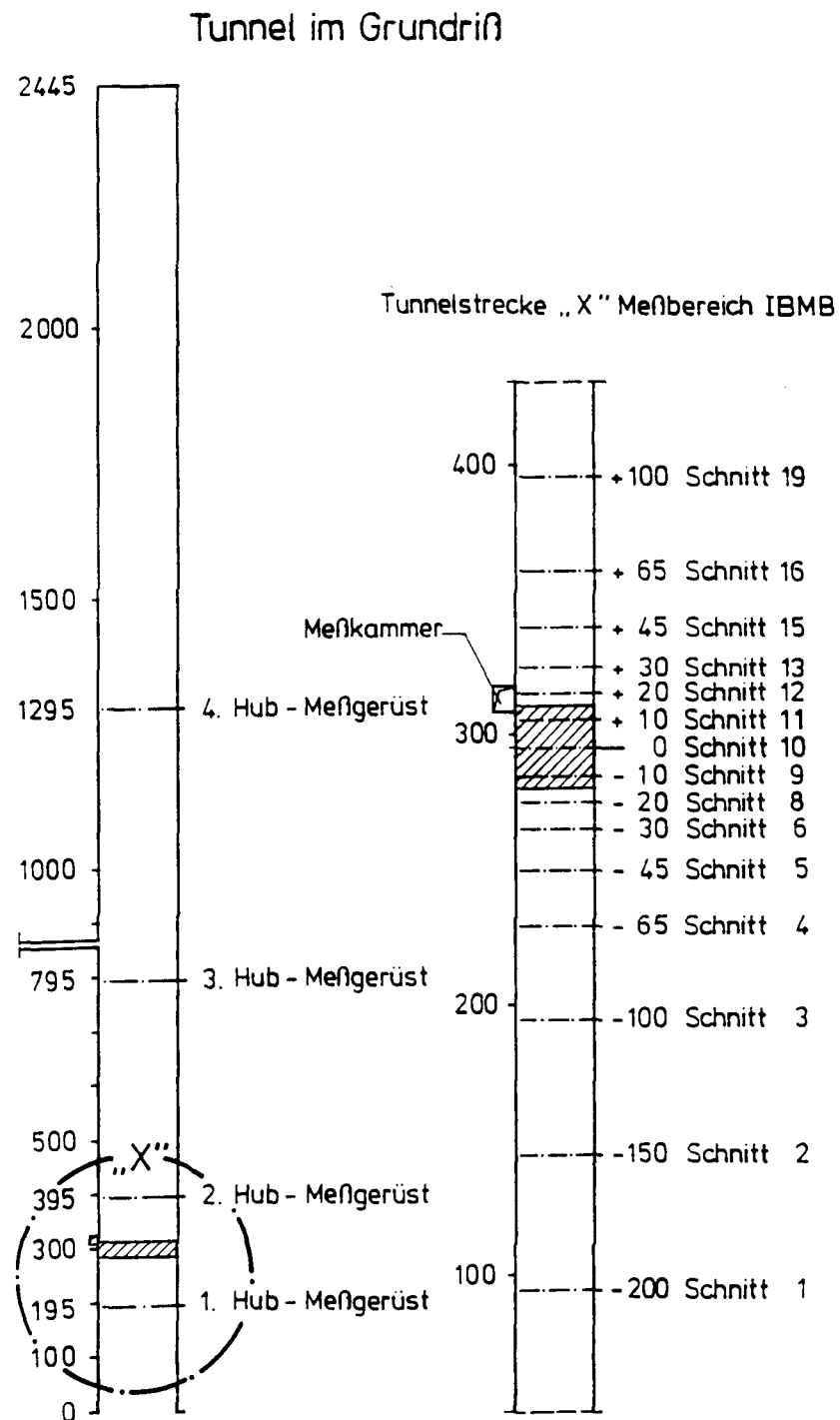
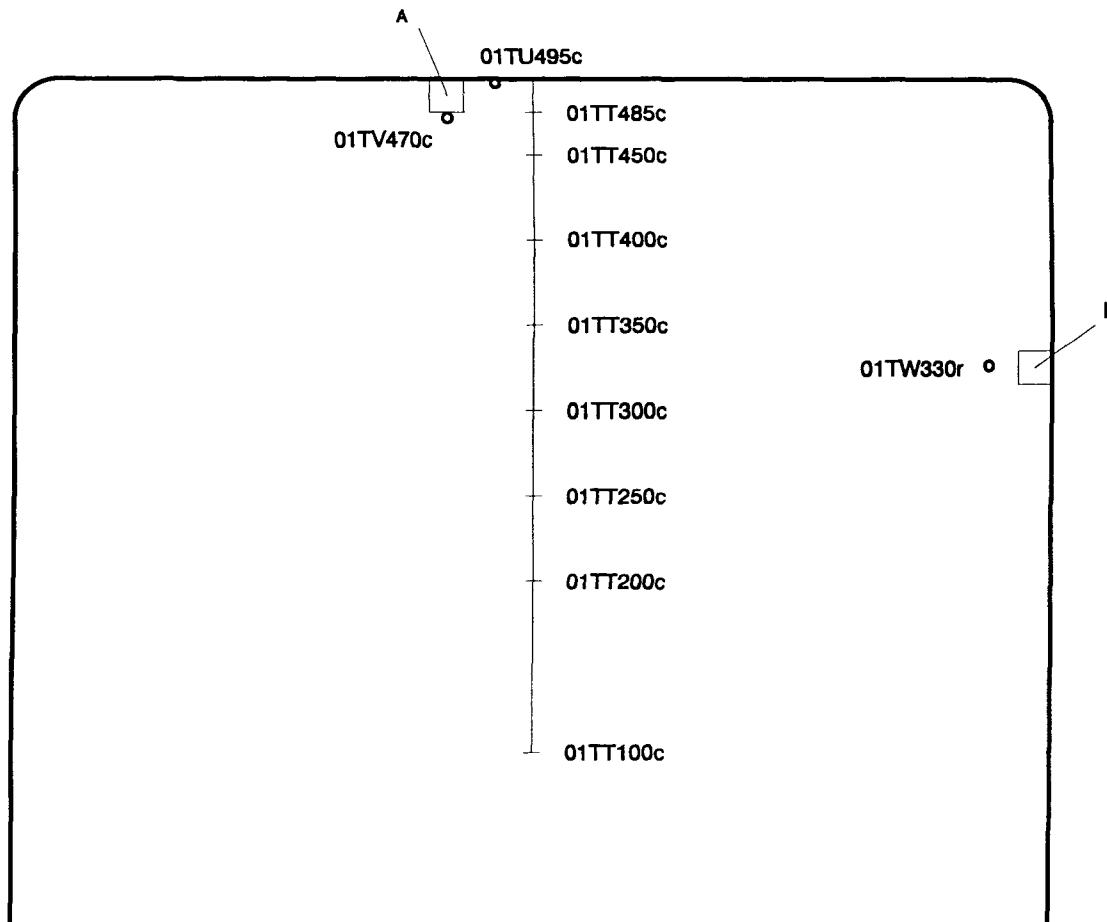


Abbildung A.1: Versuchsbereich 1992

Cross-section 1, location: -200 m

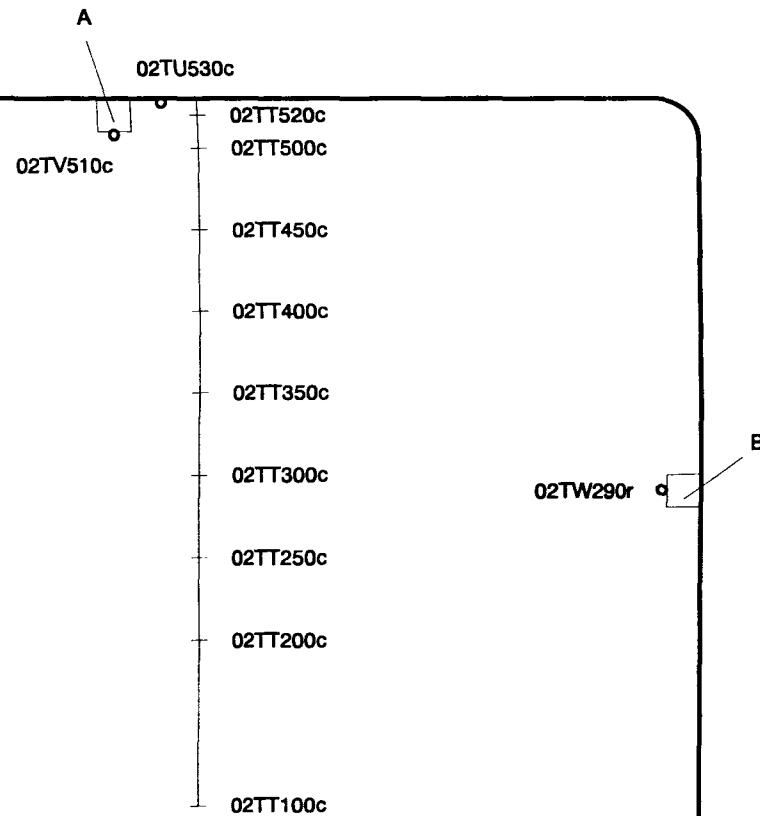
A = 01TA470c - 01TD470c

B = 01TA330r - 01TD330r

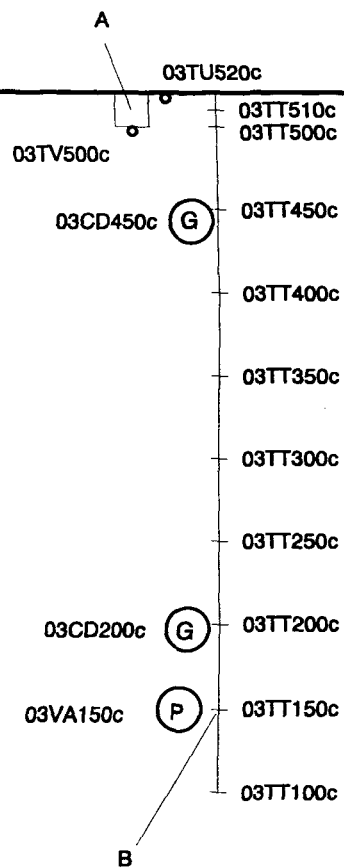


Cross-section 2, location: -150 m

A = 02TA510c - 02TD510c
B = 02TA290r - 02TD290r



Cross-section 3, location: -100 m

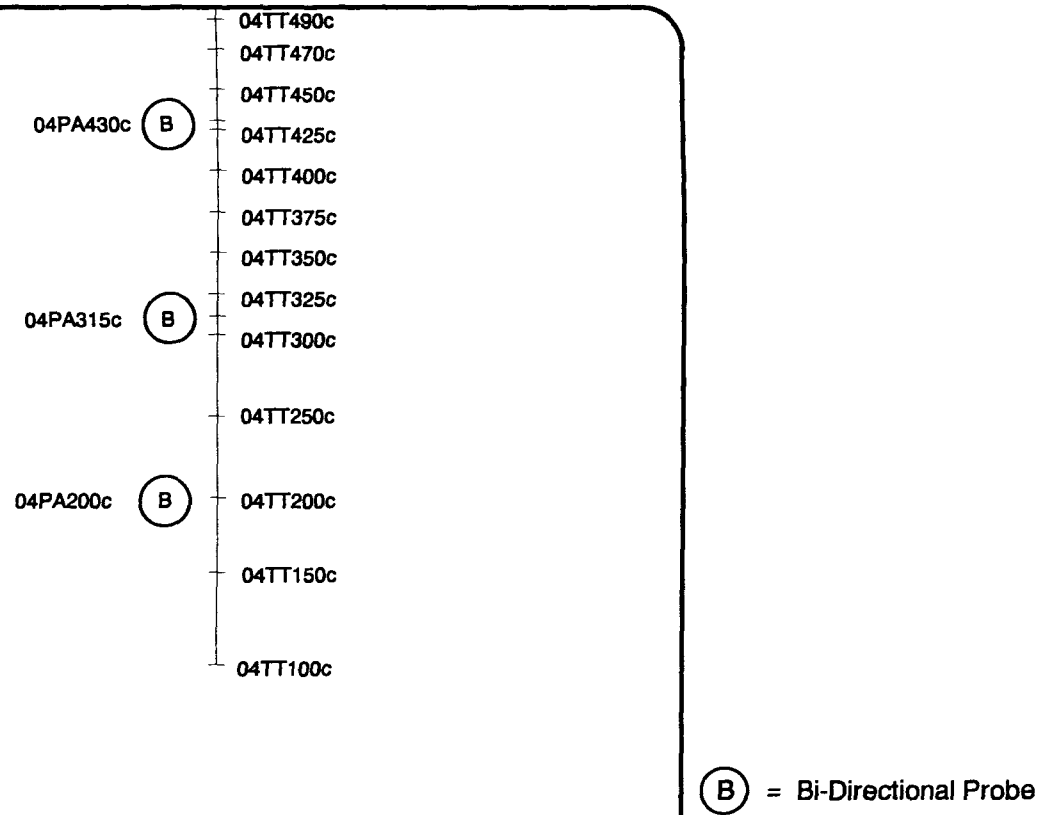


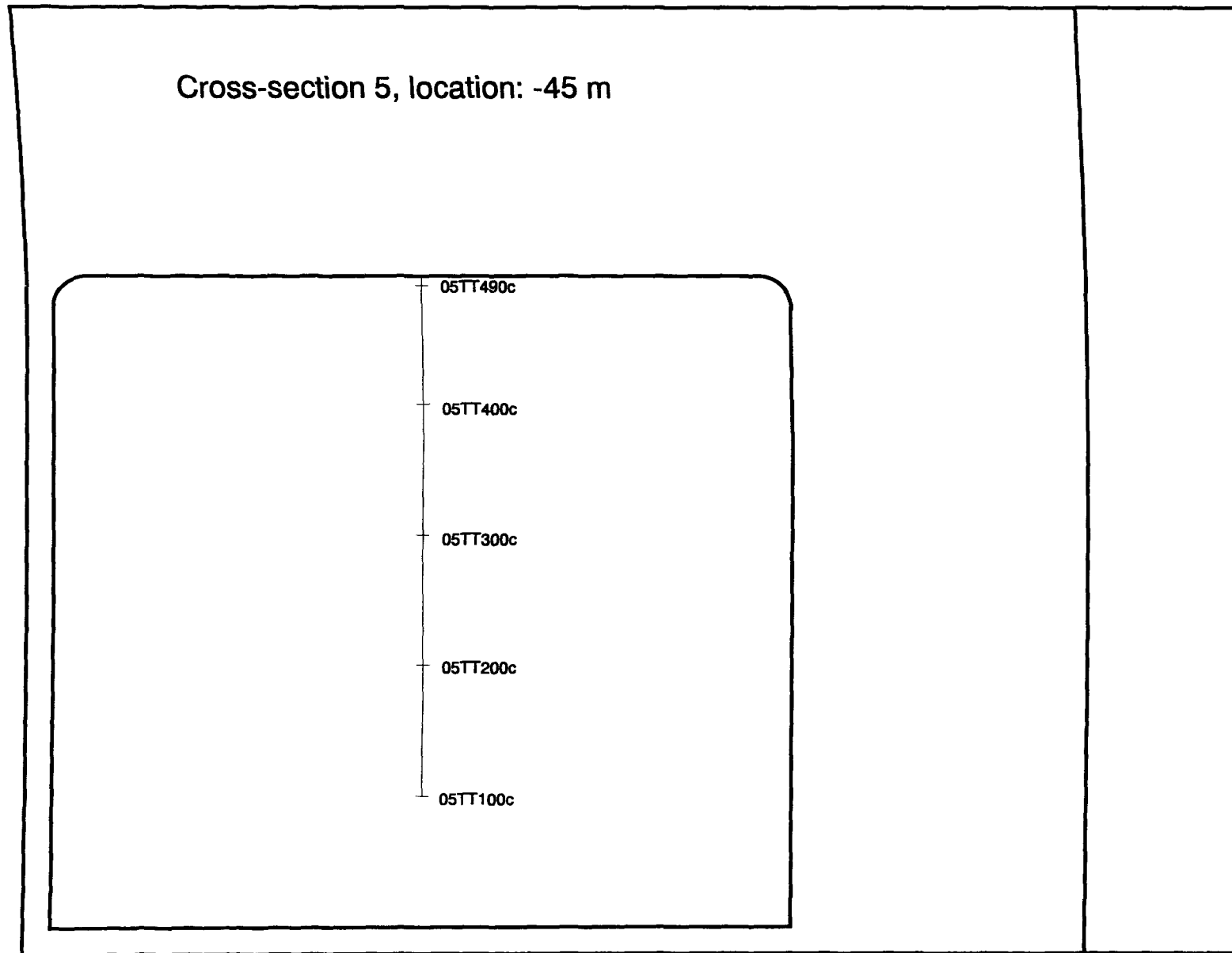
A = 03TA500c - 03TD500c

B = 03OD150c - 03LT150c

(G) = Gasanalyse
(P) = Propeller Anemometer

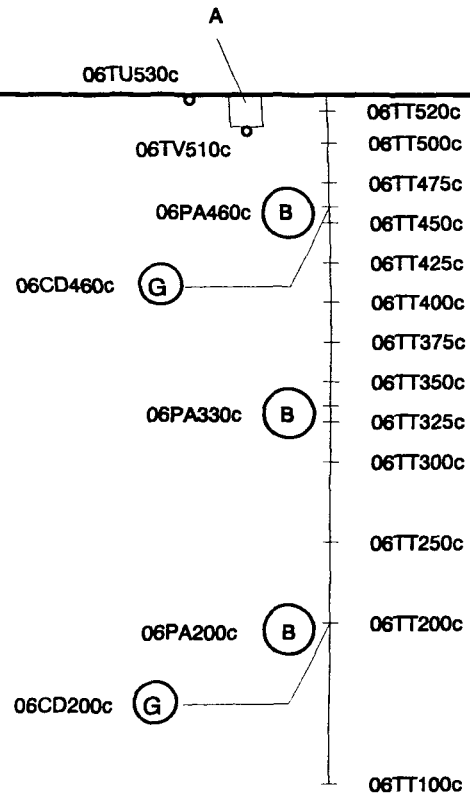
Cross-section 4, location: -65 m





Cross-section 6, location: -30 m

A = 06TA510c - 06TD510c



Cross-section 8, location: -20 m

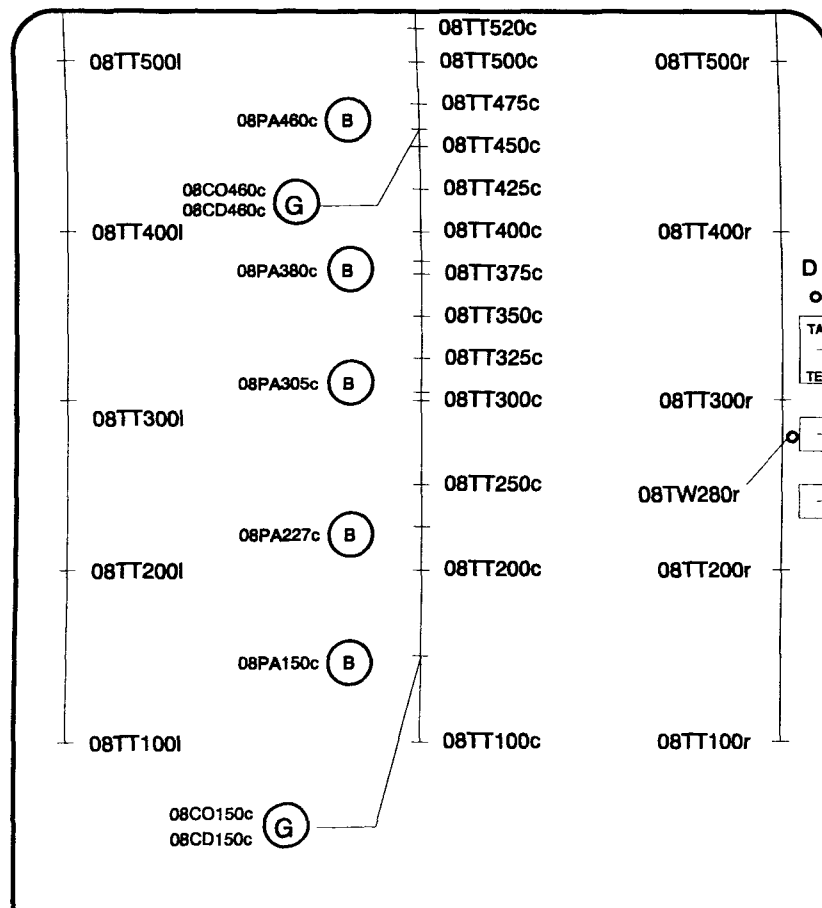
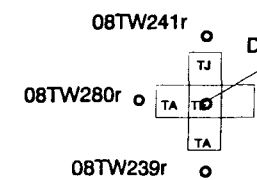
A = 08TA280r - 08TE280r

B = 08TA240r - 08TJ240r

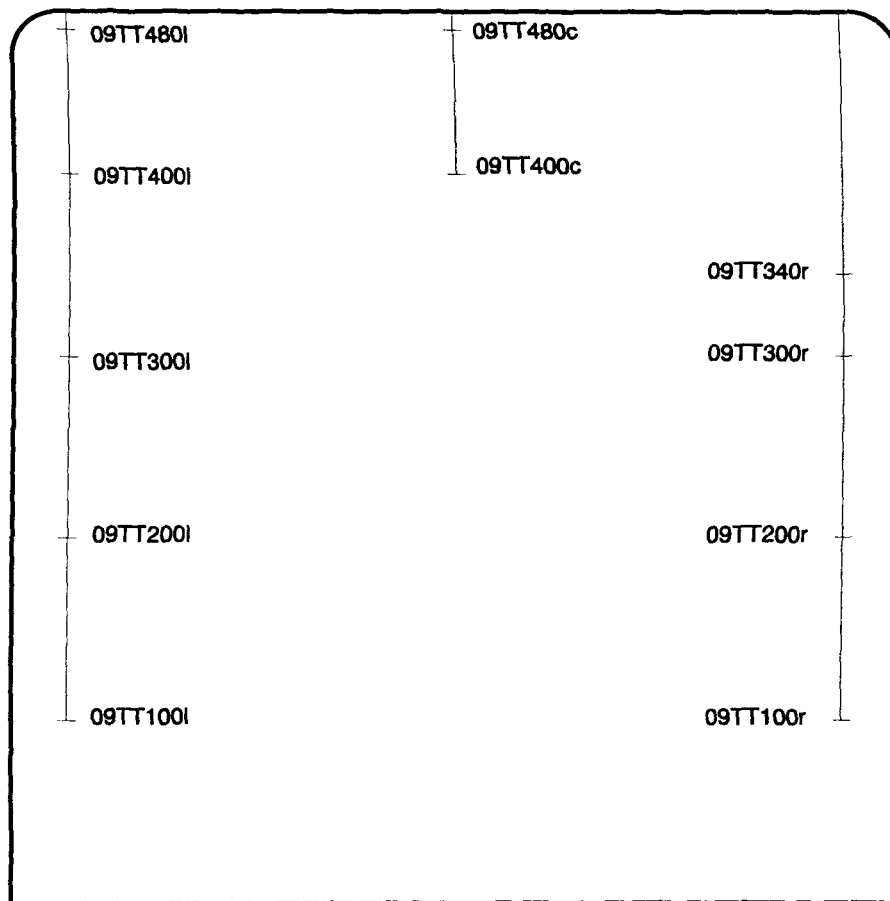
C = 08TA350r - 08TE350r

D = 08TW360r

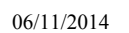
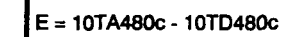
Top View



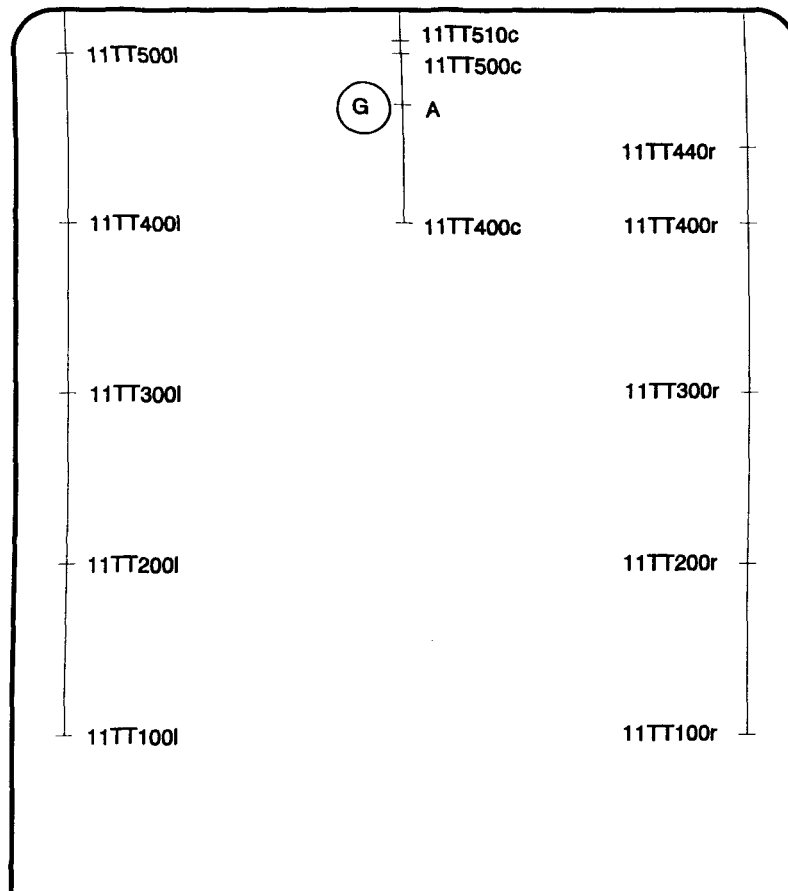
Cross-Section 9, location: -10 m



Cross-section 10, location: 0 m

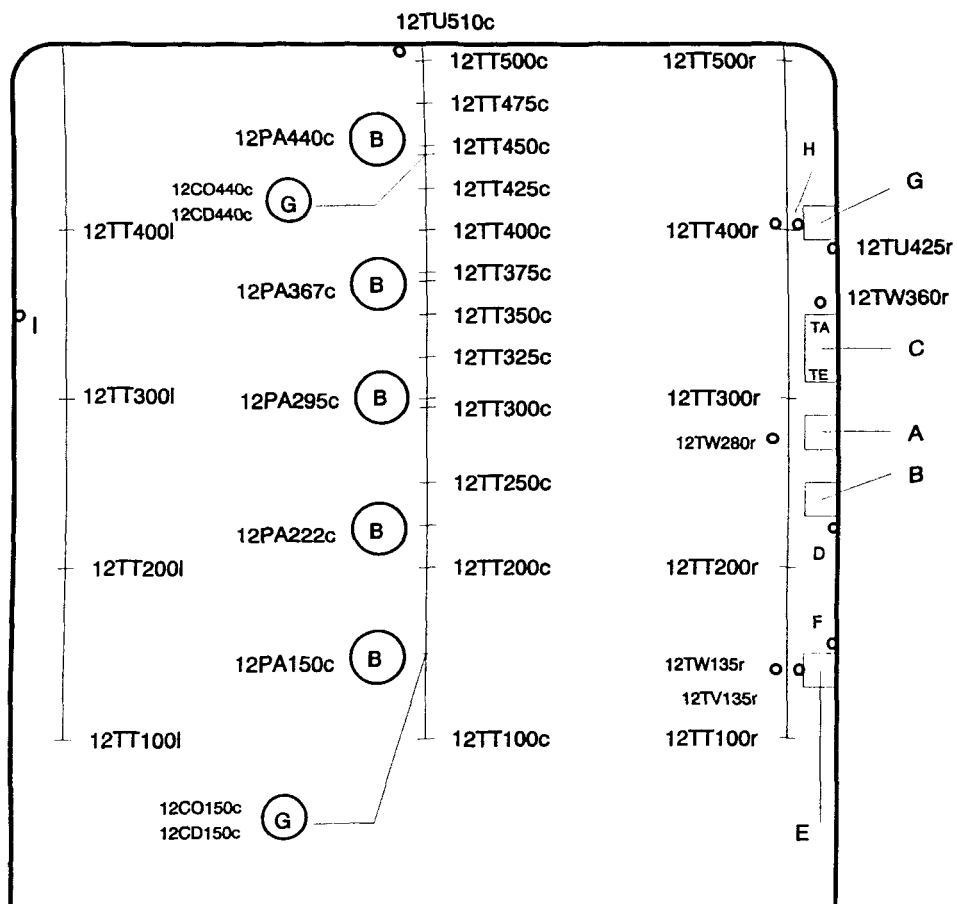


Cross-section 11, location: +10 m

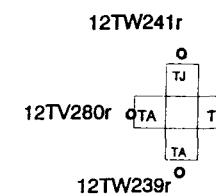


A =
11CO470c
11CD470c
11OO470c
11CN470c
11SO470c
11NO470c

Cross-section 12, location: +20 m

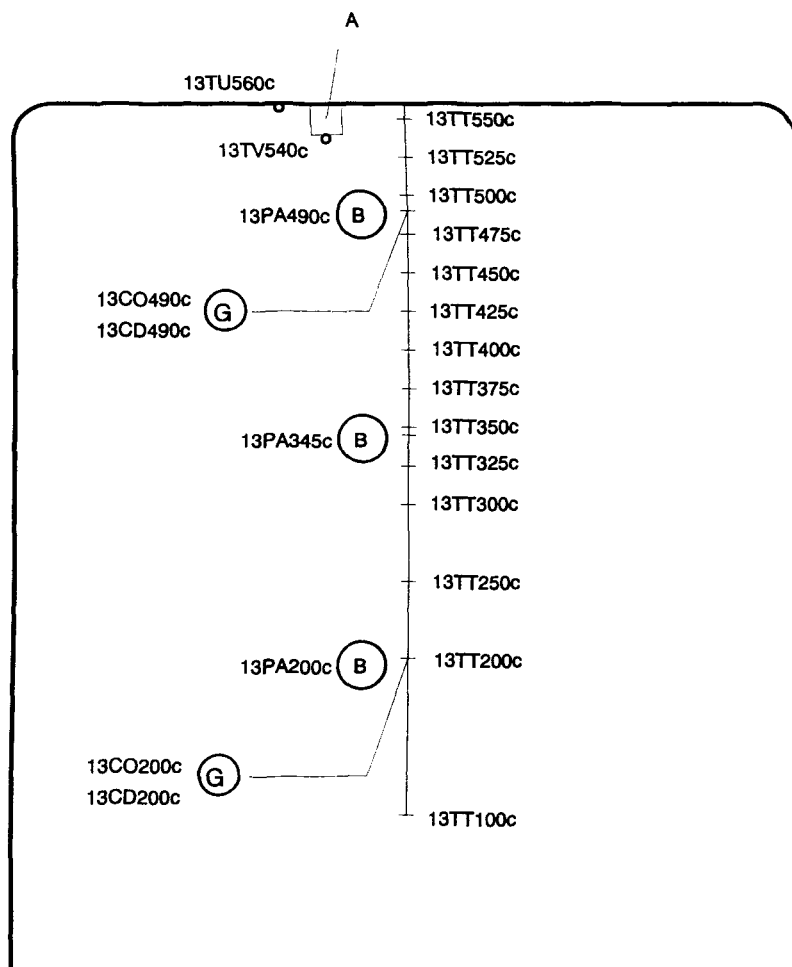


Top View



Cross-section 13, location: +30 m

A = 13TA540c - 13TD540c



Cross-section 15, location: +45 m

15TT515c
15TT500c

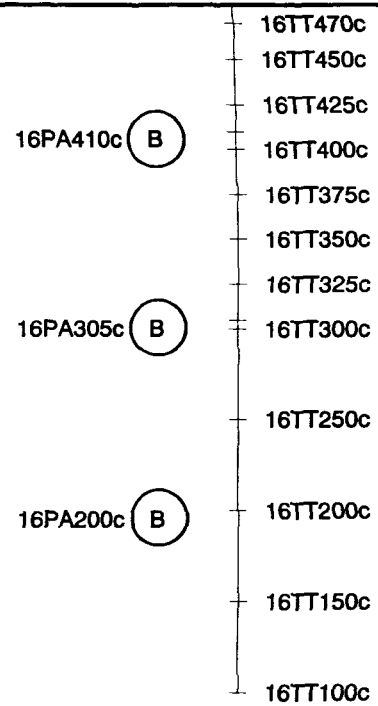
15TT400c

15TT300c

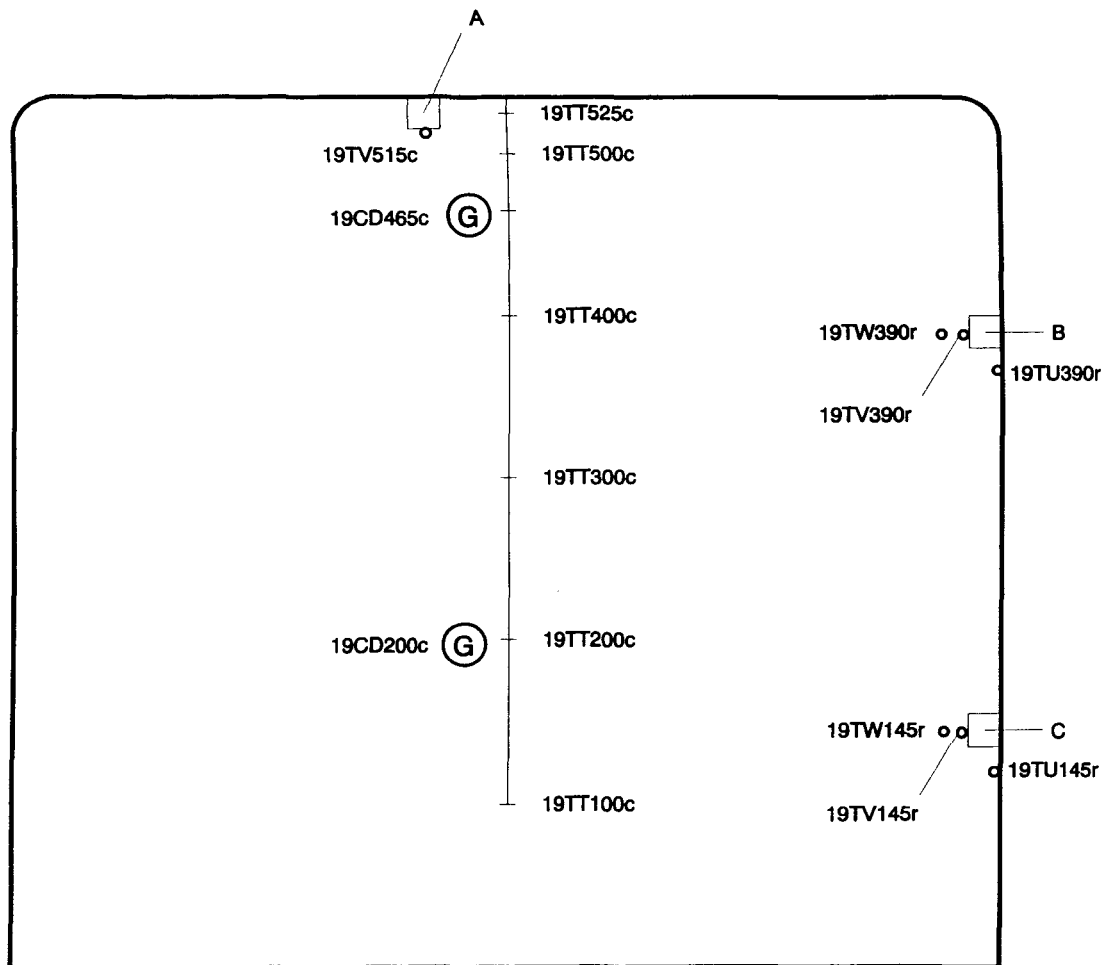
15TT200c

15TT100c

Cross-section 16, location: +65 m



Cross-section 19, location: +100 m



A = 19TA515c - 19TD515c

B = 19TA145r - 19TE145r
19TS145r

C = 19TA390r - 19TE390r
19TS390r

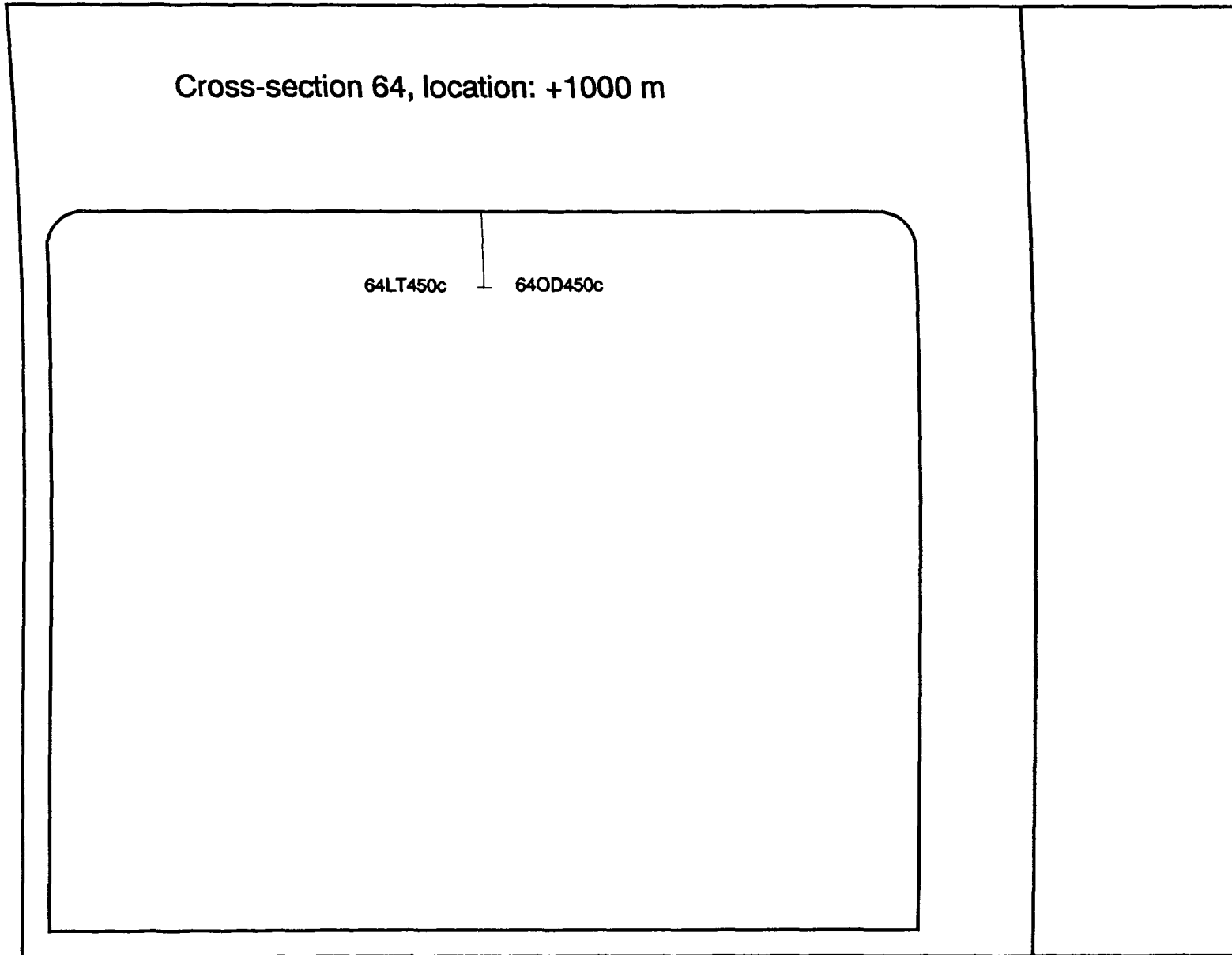
Cross-section 32, location: +300 m

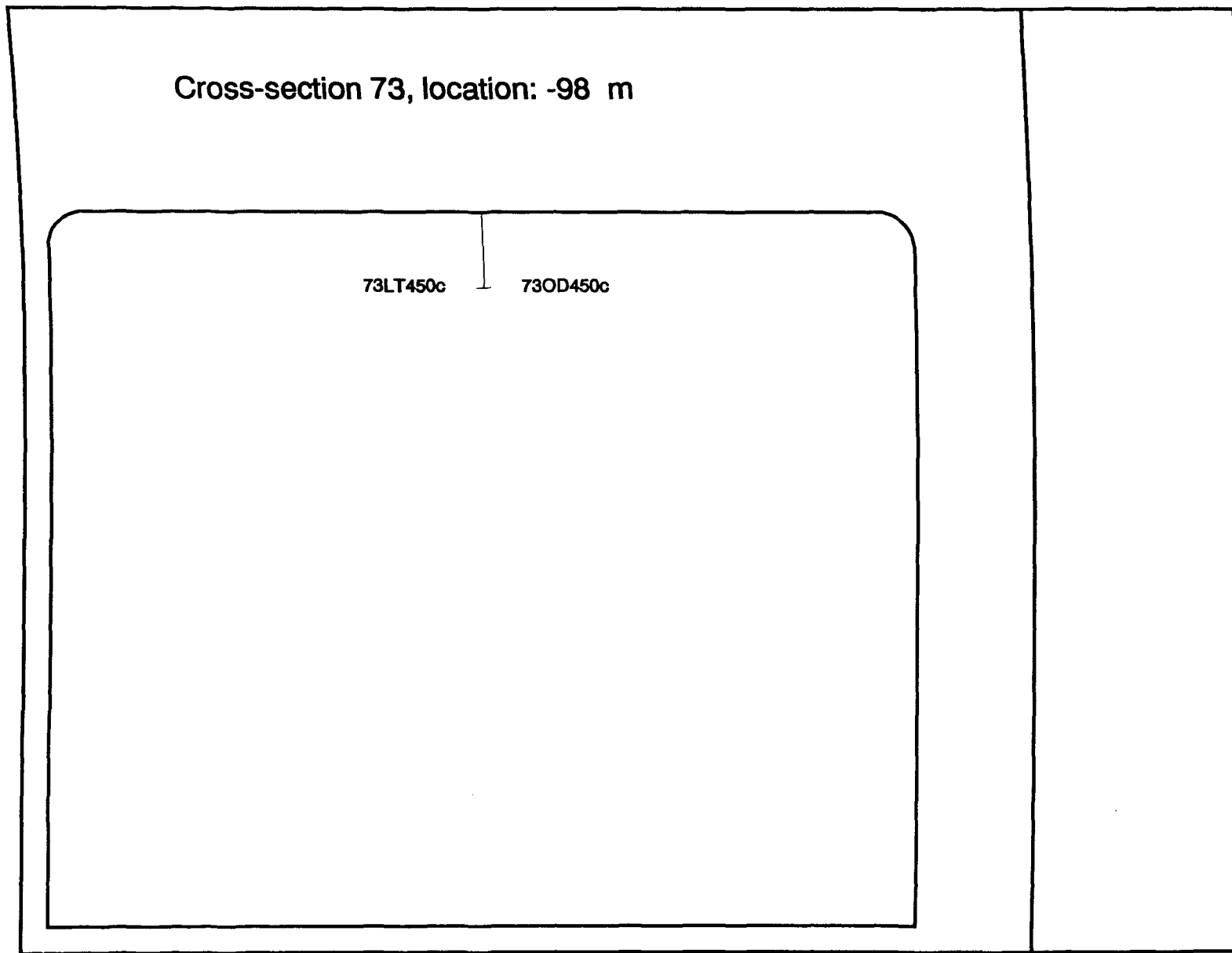
32LT450c

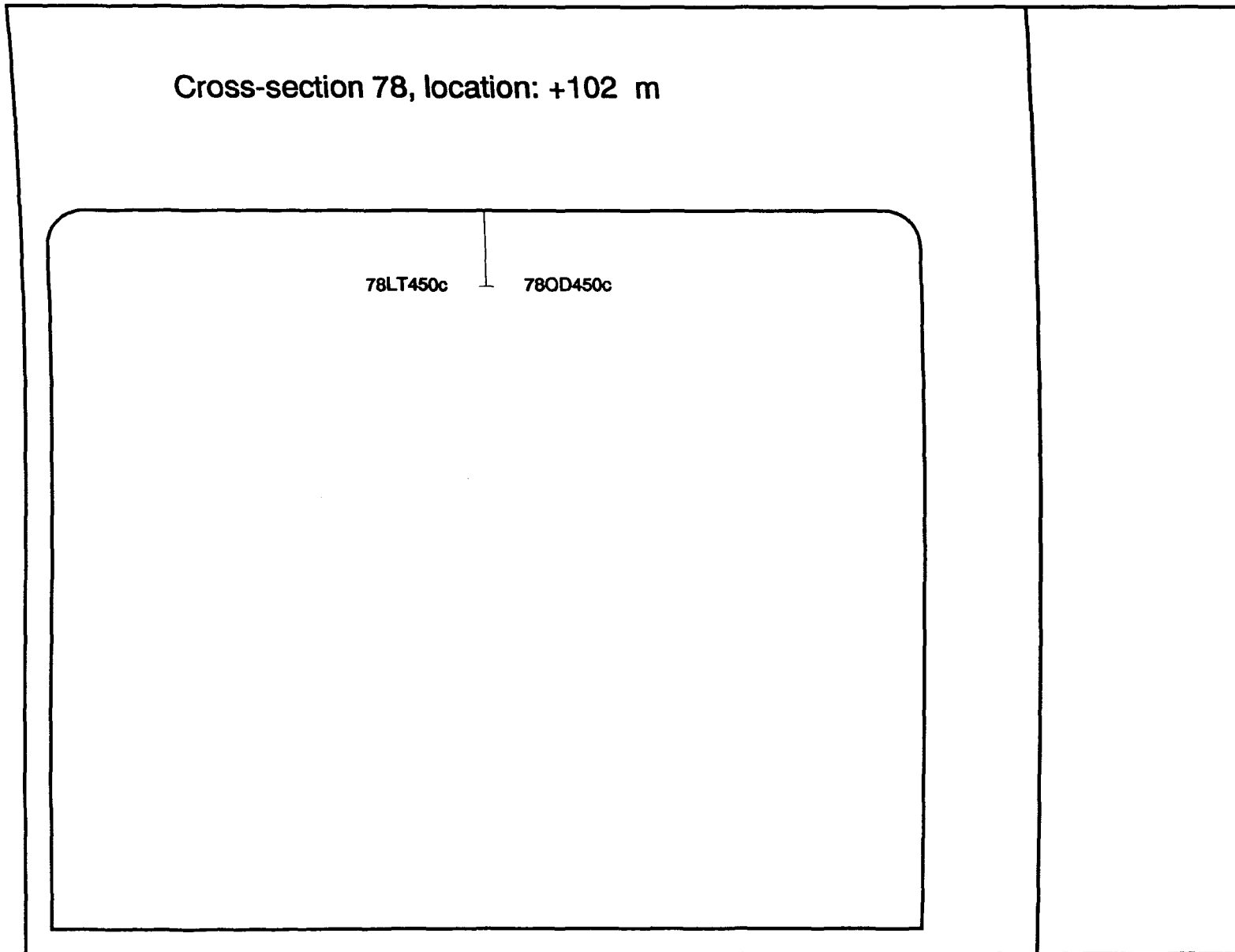
32OD450c

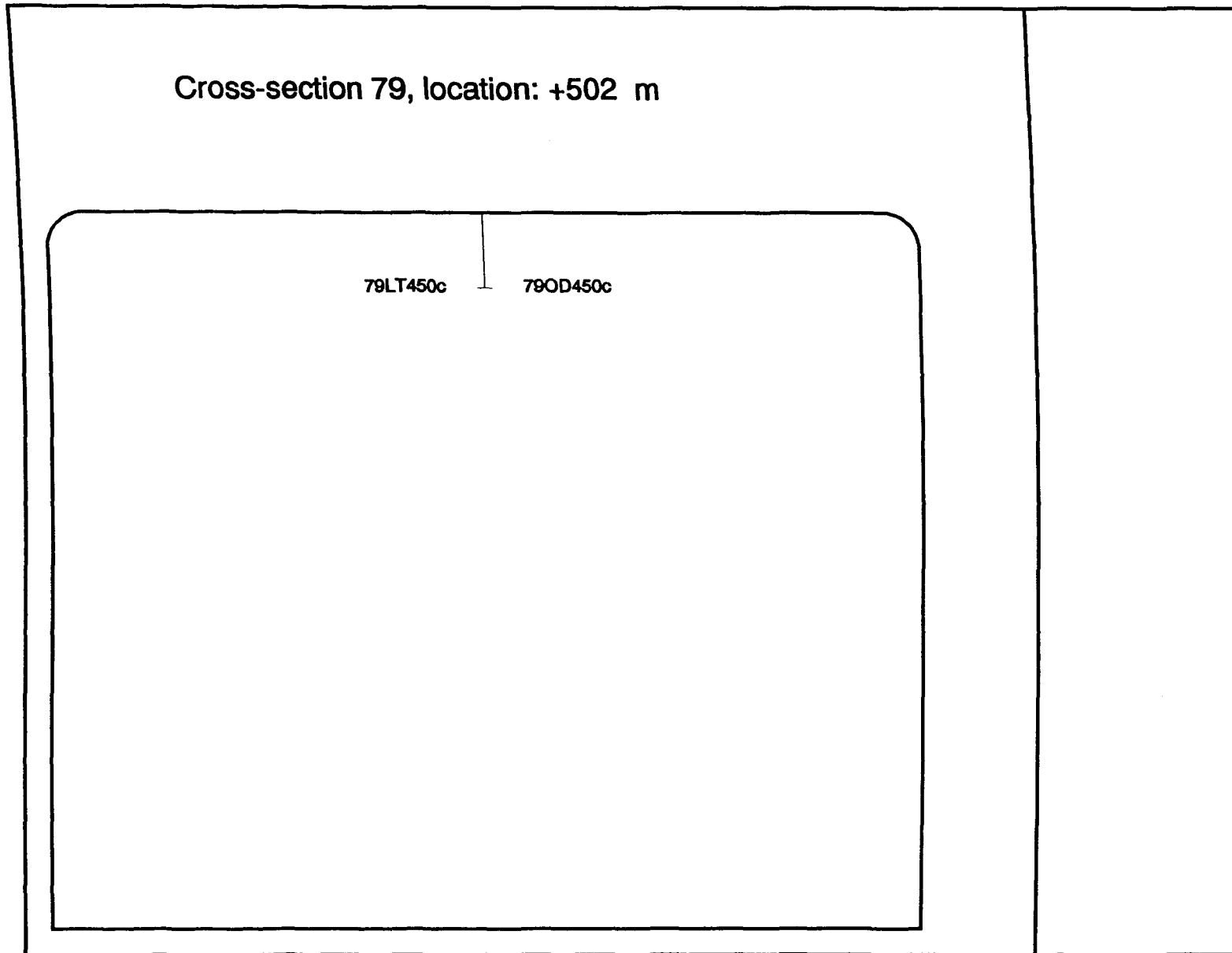
32LT150c

32OD150c









7090 ! ✓
TOPSECRET ! ✓

11. Mai 1994

30 - 0572/92